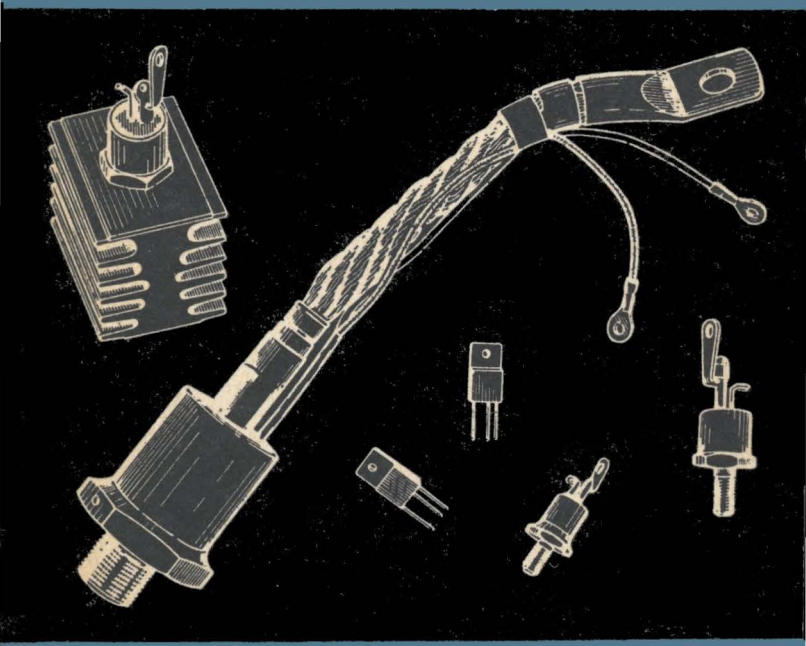
amateurreihe

electronica



Günter Pilz

Basteln mit Thyristoren

189

electronica · Band 189

GÜNTER PILZ

Basteln mit Thyristoren

MILITÄRVERLAG
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN
REPUBLIK

2. Auflage, 1981, 16. — 40. Tausend
© Militärverlag
der Deutschen Demokratischen Republik (VEB) — Berlin, 1981
Lizenz-Nr. 5
LSV: 3539
Lektor: Wolfgang Stammler
Typografie: Helmut Herrmann
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme Potsdam
Redaktionsschluß: 15. September 1980
Bestellnummer: 746 289 4
DDR 1,90 M

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	5
1.	**Die wichtigsten Eigenschaften von Thyristoren**	8
1.1.	Aufbau des Thyristors	9
1.2.	Wirkungsweise des Thyristors	10
1.3.	Kennlinien	12
1.4.	Zünden des Thyristors	14
1.5.	Eigenschaften des Thyristors	16
1.5.1.	Einschaltzeit	16
1.5.2.	Spannungsanstiegsgeschwindigkeit	16
1.5.3.	Stromanstiegsgeschwindigkeit	17
1.5.4.	Ausschaltvorgang	18
1.5.5.	Thermische Eigenschaften	19
1.6.	Schutzmaßnahmen	20
1.6.1.	Überspannungsschutz	20
1.6.2.	Überstromschutz	22
1.6.3.	Schutzbeschaltung der Steuerelektrode	22
2.	**Zündschaltungen**	23
2.1.	Gleichspannungszündung	23
2.2.	Wechselspannungszündung	24
2.3.	Impulszündung	25
2.4.	Anwendungsbeispiele für Zündschaltungen	27
2.4.1.	Phasenanschnittschaltung für einen Stromflußwinkel von 90 °	28
2.4.2.	Schaltung zur Ansteuerung antiparallelgeschalteter Thyristoren	29
3.	**Anwendungsmöglichkeiten für Gleichstrom**	32
3.1.	Thyristorschalter	32
3.2.	Alarmschaltung	34
3.3.	Intervallschalter für Scheibenwischer	36
3.4.	Zündschaltung für Ottomotoren	37
3.5.	Elektronisches Türschloß	40
3.6.	Ringzähler mit Thyristoren	44

4. Anwendungsmöglichkeiten für Wechselstrom 46
4.1. Wechselstromschalter 46
4.2. Notstromschalter 47
4.3. Universelle Blinkschaltung 48
4.4. Blinkschaltung mit Multivibratoransteuerung 49
4.5. Lichtempfindlicher Schalter 51
4.6. Kontaktloser Zeitschalter 52
4.7. Zeitschalter mit Relais 55
4.8. Überstromschalter 57
4.9. Temperaturregelung 58
4.9.1. Temperaturregelung für kleinere Verbraucher 58
4.9.2. Kontinuierlich einstellbare Heizleistung 61
4.10. Einfache Drehzahlregelung für Universalmotoren ... 61
4.11. Drehzahlregulierung mit Wechselstromsteller 63
4.12. Elektronisch geregelte Drehzahl 64
4.13. Temperaturabhängige Motorsteuerung 67
4.14. Überlastschutz für Motoren 68
4.15. Stufenlose Helligkeitssteuerung von Glühlampen .. 70
4.16. Stufenlose Helligkeitssteuerung von Leuchtstofflampen 72
4.17. Ladegerät für Kleinakkumulatoren 74
4.18. Kurzschlußfestes Netzteil 75

5. Montage, Prüfungen und Versuchsaufbau 78
5.1. Hinweise zur Montage und Wartung, Fehlerquellen .. 78
5.2. Einfaches Prüfgerät für Thyristoren 81
5.3. Bemerkungen zum Versuchsaufbau 83

6. Literaturhinweise 87

7. Anhang 89

Vorwort

Der Thyristor ist seit seinem Erscheinen innerhalb kurzer Zeit zu einem bedeutenden Bauelement der Leistungselektronik geworden. Er ist ein steuerbarer Gleichrichter, der sich ein breites Anwendungsfeld auf allen Gebieten der elektronischen Steuerungs- und Regelungstechnik erobert hat. Seine guten Eigenschaften, wie hohe Leistungsverstärkung (10^4 bis 10^5), hoher Wirkungsgrad und gute Zuverlässigkeit, Betriebsfrequenzen von einigen Hertz bis 100 kHz, geringes Gewicht, Wartungsfreiheit u. a. m., bestimmen gleichzeitig auch seine Hauptanwendungsgebiete. So werden Thyristoren u. a. verwendet in Gleichrichteranlagen mit regelbarer Gleichspannung, für Stromrichterantriebe mit Richtungsumkehr des Stromes, zur Helligkeitssteuerung von Beleuchtungseinrichtungen, zur Drehzahlregelung von Elektromotoren, für Umrichter zur Frequenzumwandlung (50 Hz in 16 2/3 Hz), für Wechselrichter, als elektronische Schalter in Gleich- und Wechselstromkreisen und als Speicherelemente in der Digitaltechnik.

Mit dem Thyristor sind gleichzeitig viele neue Begriffe entstanden. Auch ist er in seinen Eigenschaften oft komplizierter als andere Halbleiterbauelemente. Aus diesem Grunde ist es erforderlich, sich eingehend mit seinen Eigenschaften vertraut zu machen. Gelegenheit dazu bietet u. a. der in der Amateurreihe *electronica* erschienene Titel *Thyristoren — Eigenschaften und Anwendung* (Band 139). Während bei dem genannten Titel das Hauptaugenmerk auf allgemeinen Betrachtungen und theoretischen Erörterungen lag, soll der Leser in diesem Heft, neben kurzen Erläuterungen zu Fragen über den Aufbau und wichtige Eigenschaften des Thyristors, hauptsächlich an Hand von praktischen Anwendungsbeispielen mit dem Aufbau von Thyristorschaltungen bekannt gemacht werden. Grundsätzliche Begriffe und Kenntnisse aus der Halbleitertechnik werden dabei vorausgesetzt. Prinzipiell lassen sich in den einzelnen Schaltungen auch andere Thyristoren als angegeben verwenden. Zu beachten ist dabei die Einhaltung aller technischen Daten. Häufige Fehlerursache beim Nichtfunktionieren einer Thyristorschaltung ist ein zu geringer Zündstrom.

Für die Sicherungen wurden in den meisten Fällen keine Angaben gemacht. Sie sind jeweils optimal an den entsprechenden Verbraucher anzupassen. Bis auf wenige Ausnahmen ist dabei der Einsatz flinker bzw. überflinker Sicherungen zu empfehlen.

Auf zwei besonders wichtige und stets zu beachtende Punkte sei bereits an dieser Stelle hingewiesen.

1. Besonders bei Phasenanschnittschaltungen entstehen durch die steilen Einschaltflanken Oberwellen, die in ihrem Frequenzumfang bis in den Hörrundfunkbereich hineingehen. Da sich diese Oberwellen über die Netzzuleitung auch auf das übrige Leitungsnetz ausbreiten, kann es zu Rundfunkstörungen im eigenen Haushalt oder in dem der Nachbarn kommen. Die Ausstrahlung dieser HF-Störungen ist nach den Funkschutz- und Entstörungsbestimmungen unzulässig (TGL 20885, besonders Blatt 5!). Um diese weitgehend bzw. völlig zu vermeiden, muß zwischen Netz und Thyristorschaltung ein *LC*-Filter geschaltet werden, das wie ein Tiefpaßfilter wirkt und verhindert, daß hochfrequente Störungen in das Wechselstromnetz gelangen. Das Filter besteht aus je einer HF-Drossel von etwa 100 μH in der Netzzuleitung und einem Kondensator von 0,1 μF, der zwischen die beiden Netzzuleitungen zu schalten ist. Die Drosseln kann man sich leicht selbst herstellen, indem man auf einen Ferritstab von 8 mm Durchmesser (Stab für Ferritantenne) etwa 55 Windungen aufbringt. Die Drahtstärke richtet sich dabei nach dem fließenden Verbraucherstrom. CuL-Draht mit einem Durchmesser von 1 mm kann für Stromstärken bis zu 4 A verwendet werden. Bei größeren Verbraucherströmen ist die Drahtstärke entsprechend der jeweiligen Belastung zu wählen. Sollen beide Netzzuleitungen eine Drossel erhalten, so können dabei die Wicklungen auf einen gemeinsamen Ferritstab aufgebracht werden. Beide Wicklungen haben gleichen Wickelsinn. Auf sehr gute Isolierung der Wicklungen untereinander ist zu achten. Als Entstördrosseln sind manchmal auch schon die für Modellmotoren verwendeten Drosseln (etwa 10 μH/1 A) völlig ausreichend. Gute Ergebnisse erzielt man auch bei der Verwendung der handelsüblichen Entstörkondensatoren nach TGL 11840, Bl. 10. Durch eine Abschirmung der Steuereinheit oder der gesamten Thyristorschaltung trägt man ebenfalls dazu bei, die Störausstrahlung wesentlich zu verringern. Der Stromlaufplan in Bild 4.12 ist ein typisches Beispiel

für eine Schaltung mit Störschutz. Weitere Angaben zur Entstörung von Thyristorschaltungen findet der interessierte Leser bei [28]. Da dieses *LC*-Filter für viele Schaltungen in Frage kommt und außerdem von Fall zu Fall an Hand von festgestellten Störungen eingesetzt werden muß, wurde generell bei allen Schaltungen auf die Darstellung des Filters verzichtet.

2. Bei nichtleitendem Thyristor, aber weiterhin anliegender Netzspannung ist zwar der Verbraucher ausgeschaltet, liegt jedoch meistens noch mit einer Anschlußseite an der vollen Netzspannung. Dieses muß man besonders beim Arbeiten am Verbraucher während des Experimentierens oder aber bei Reparaturarbeiten besonders beachten. Muß am Verbraucher aus irgendeinem Grund gearbeitet werden, so ist zur Vermeidung von elektrischen Unfällen *der Verbraucher grundsätzlich vom Netz zu trennen!* Dieses Problem ist besonders bei Schaltungen mit *Thyristorschaltern* zu beachten!

Diese beschriebenen Schaltungen sind lediglich für Versuchs- bzw. Amateurzwecke gedacht. Dabei wurden Schaltungen ausgewählt, die von allgemeinem Interesse sein dürften. Da zum Experimentieren oftmals gerade vorhandene Bauteile benutzt werden mußten, besteht durchaus die Möglichkeit, einige Schaltungen optimaler zu gestalten.

Stralsund, Dezember 1979 *Günter Pilz*

1. Die wichtigsten Eigenschaften von Thyristoren

Der Thyristor hat sich auf Grund seiner positiven Merkmale, wie kleine Masse, geringer Raumbedarf, hoher Wirkungsgrad, relativ einfacher Schaltungsaufbau u. a., in fast allen Bereichen der Elektrotechnik in sehr kurzer Zeit erfolgreich durchgesetzt. Das gilt für die Leistungselektronik (einige hundert Ampere) genauso wie für Haushaltsgeräte und Kleinwerkzeuge. Beim Thyristor handelt es sich im Gegensatz zum üblichen Siliziumgleichrichter um einen steuerbaren Siliziumgleichrichter. Der Thyristor hat neben den charakteristischen Zuständen einer Diode, *Sperren* und *Durchlassen*, noch den Schaltzustand *Blockieren*. Das bedeutet, der Thyristor ist zunächst auch in Durchlaßrichtung verriegelt. Erst durch einen an die Steuerelektrode des Thyristors gelegten Impuls wird der Thyristor gezündet. Der Blockierzustand wird dadurch aufgehoben, und der Durchlaßstrom beginnt zu fließen. Im Gegensatz zu den Elektronenröhren oder Transistoren kann beim Thyristor der Durchlaßstrom über die Steuerelektrode nicht beeinflußt werden. In dieser Frage ähnelt der Thyristor dem seit langem bekannten Thyratron. Nur hat der Thyristor gegenüber dem Thyratron wesentlich bessere Eigenschaften aufzuweisen (der Thyristor ist sofort betriebsbereit, keine Heizspannung erforderlich, vergleichbar kleinere Steuerleistung, schnelleres Schaltverhalten). Der Schaltzustand *Durchlassen* kann nur unterbrochen werden, indem der fließende Hauptstrom für kurze Zeit unterbrochen wird. Bei direktem Wechselstrombetrieb geschieht das stets beim Nulldurchgang der Spannung bzw. des Stromes. Bei Gleichstrombetrieb werden spezielle *Löschschaltungen* benötigt. Auf Grund seines schnellen Schaltverhaltens eignet sich der Thyristor besonders zur Lösung von Aufgaben in der Steuerungs- und Regelungstechnik, bei denen schnell, kontaktlos und verlustarm geschaltet wird. Weiterhin können große Leistungen bei hohen Arbeitsspannungen völlig funkenfrei geschaltet werden. Zur Zeit stellt man Thyristoren her, die für Durchlaßströme von weniger als 1 A bis zu einigen hundert Ampere geeinget sind. Die Sperrspannungen haben Werte zwischen 50 V und einigen tausend Volt (Spitzenwert!). Durch Parallelschaltung mehrerer

Thyristoren läßt sich prinzipiell der Strombereich und durch Reihenschaltung der Spannungsbereich erweitern. Diese Parallel- und Serienschaltungen erfordern in den meisten Fällen allerdings besondere Schaltungsmaßnahmen für eine gleichmäßige Strom- bzw. Spannungsaufteilung an den Thyristoren (siehe auch [1] und [24]). Für Amateure dürfte jedoch die Frage einer Reihen- oder Parallelschaltung von Thyristoren nur von zweitrangiger Bedeutung sein, da für Bastelzwecke entsprechend leistungsstarke Typen zur Verfügung stehen. Es soll hier lediglich die prinzipielle Möglichkeit einer Erweiterung des Spannungs- bzw. Strombereichs gezeigt werden. Wie bereits angedeutet, ist das Anwendungsgebiet des Thyristors sehr vielseitig. So werden z. B. Leistungsthyristoren für die Drehzahlregelung von Gleichstromantrieben bei Werkzeug- und Papiermaschinen angewendet. Weitere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich bei Triebfahrzeugen zur direkten Speisung und Steuerung der Fahrmotoren, in der Kraftfahrzeugtechnik, bei Beleuchtungsanlagen, in der Unterhaltungselektronik (z. B. Horizontalablenkstufen von Fernsehempfängern, Lichtorgeln, Netzteile usw.), im Schiffbau (Windensteuerungen, Elektrofischerei, Wellengenerator), und sie wirken als Ein- und Ausschalter (kontaktloses Wechselstromschütz). Die genannten Beispiele sollen in bescheidenem Maße zeigen, wie vielseitig die Anwendungsmöglichkeiten der Thyristoren sind. Immer noch werden neue Anwendungsgebiete gefunden und erschlossen.

1.1. Aufbau des Thyristors

In Bild 1.1 ist der prinzipielle Aufbau eines Thyristors dargestellt. Der Thyristor hat 3 Anschlüsse — die Anode, die Katode und die Steuerelektrode (auch *Gate* genannt). Zwischen den beiden Hauptanschlüssen, der Anode und der Katode, befinden sich 4 Halbleiterschichten. Davon sind 2 p-leitend und 2 n-leitend. Die Schichten sind so angeordnet, daß sich eine pnpn-Struktur ergibt. Die Mittelzone enthält wenige Ladungsträger und ist damit hochohmig. Die äußeren Zonen dagegen enthalten viele Ladungsträger.

Als Ausgangsmaterial benutzt man eine n-leitende Siliziumscheibe. Durch Legierungs- und Diffusionsverfahren werden die ein-

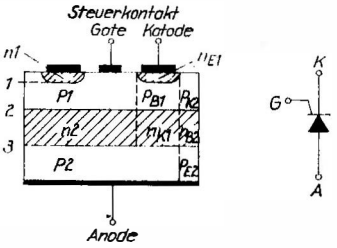


Bild 1.1 Prinzipieller Aufbau und Schaltzeichen des Thyristors

zelnen Schichten hergestellt. Die beiden p-leitenden Zonen entstehen durch ein Diffusionsverfahren, indem man Fremdatome der 3. Gruppe des Periodensystems der Elemente eindiffundiert. Anode, Katode und Steuerelektrode wiederum werden im Legierungsverfahren hergestellt. Die Art der Kontaktierung ist bei kleineren und größeren Thyristortypen unterschiedlich. Man unterscheidet dabei im wesentlichen 2 Möglichkeiten — hartgelötete Thyristoren und druckkontaktierte Thyristoren. Bei kleineren Bauformen wird das Vierschichtelement mit seiner Trägerscheibe zwischen dem Kupferboden (Anode) und den oberen Kontakten (Katode und Steuerkontakt) *hart* eingelötet. Bei größeren Bauformen ist eine solche Kontaktierung ungünstig, da durch den größeren Strom auch größere thermische Belastungen für das gesamte Bauelement auftreten. So würden u. a. mechanische Spannungen in den verbindenden Lötstellen entstehen, die zu einer Beschädigung führen können und damit den Thyristor unbrauchbar machen. Man bevorzugt deshalb für größere Thyristortypen die Druckkontakttechnik. Dabei wird die Thyristortablette unter hohem Druck mit einem Federpaket zwischen die beiden Anschlußelektroden gepreßt. Bei den üblichen Bauformen der Thyristoren ist die Thyristortablette rund. Auf diese Weise vermeidet man Feldstärkespitzen an den Rändern. Die Steuerelektrode befindet sich am Rand oder in der Mitte der Tablette

1.2. Wirkungsweise des Thyristors

Zur Erklärung der Wirkungsweise eines Thyristors zerlegt man gedanklich das in Bild 1.1 dargestellte Vierschichtelement in eine Kombination von einem npn- und einem pnp-Transistor, die so

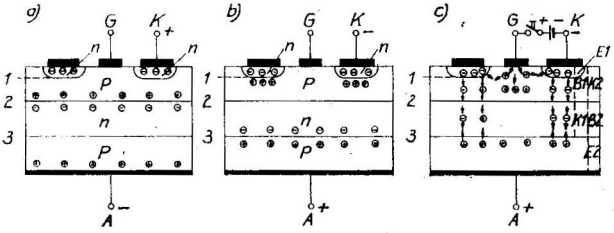


Bild 1.2 Schaltzustände des Thyristors; a — „Sperren", b — „Blockieren", c — „Durchlaßzustand"

zusammengeschaltet sind, daß sie jeweils Basis und Kollektor gemeinsam haben. Zwischen den einzelnen Schichten entstehen Übergangszonen. Legt man nun an die Katode und Anode eine Spannung, und zwar so, daß sich der negative Pol an der Anode und der positive Pol an der Katode befindet, verarmen die Übergänge 1 und 3 an beweglichen Ladungsträgern. Diese beiden Übergänge sind also in Sperrichtung gepolt, während der Übergang 2 in Durchlaßrichtung gepolt ist (Anreicherung von beweglichen Ladungsträgern). Man bezeichnet diesen Schaltzustand des Thyristors als *Sperren*. Weiterhin spricht man hierbei von einer *Rückwärtsbeanspruchung* des Thyristors (s. Bild 1.2a).

Wird nun die Spannung so angelegt, daß sich der positive Pol an der Anode und der negative Pol an der Katode befindet, wobei die Steuerelektrode immer noch potentialfrei ist, verarmt der Übergang 2 an frei beweglichen Ladungsträgern und blockiert auf diese Weise den Stromfluß durch den Thyristor. Wie aus Bild 1.3 zu ersehen ist, fließt nur ein ganz geringer Blockierstrom. Dieser Schaltzustand wird deshalb auch als Blockieren bezeichnet (s. Bild 1.2b). Zu beachten ist hierbei, daß in diesem Zustand der Übergang 2 die gesamte Spannung aufnimmt! Die Übergänge 1 und 3 sind jetzt in Durchlaßrichtung gepolt.

Um den Thyristor zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt zünden zu können, d. h., um den Thyristor in den leitenden Zustand zu versetzen, ist ein Stromimpuls nötig. Mit diesem Impuls gelangen über die Steuerelektrode des Thyristors in die Basis B1 Ladungsträger. Davon gelangt der überwiegende Teil zum Kollektorübergang und setzt damit die Sperrfähigkeit von Übergang 2 herab. Wird der schwache Basistrom verändert, folgt der stärkere

Kollektorstrom entsprechend der Stromverstärkung nach. Da der Kollektor K1 identisch ist mit der Basis B2, wird damit der Kollektorstrom des ersten „Transistors" zum Basisstrom des zweiten „Transistors". Das bewirkt unter Beachtung der Stromverstärkung eine Erhöhung des Kollektorstroms des zweiten „Transistors". Dieser Kollektorstrom wird nun wieder gleichzeitig zum Basisstrom des ersten „Transistors" (s. Bild 1.2c). Es findet also eine abermalige Vervielfachung des Stromes statt. Dieser Vorgang setzt sich mit steigender Wirkung fort, der Strom schaukelt sich lawinenartig auf. Die Mittelzone füllt sich so lange, bis ein Arbeitspunkt auf der Durchlaßkennlinie erreicht ist. Der Steuerstrom kann nun abgeschaltet werden, da sich mit ihm der Thyristor nicht weiter beeinflussen läßt. Dieser Schaltzustand des Thyristors wird als *Durchlaßzustand* bezeichnet.

1.3. Kennlinien

Um das Verhalten des Thyristors besser verstehen zu können, soll zunächst die in Bild 1.3 dargestellte charakteristische Arbeitskennlinie eines Thyristors etwas näher betrachtet werden.

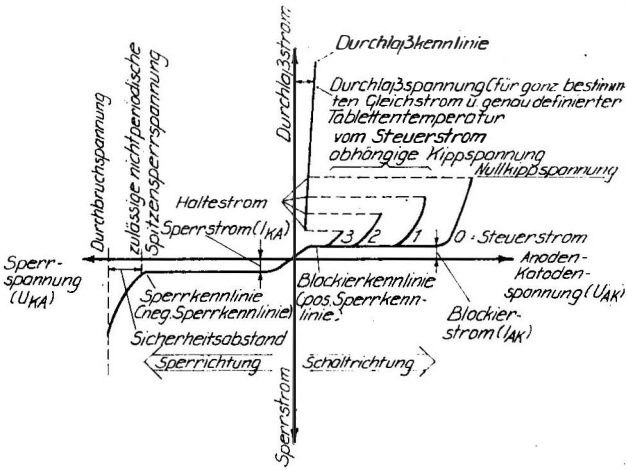


Bild 1.3 Charakteristische Arbeitskennlinie eines Thyristors

Die Kennlinien bedeuten dabei die Abhängigkeiten von Strom und Spannung zwischen den beiden Hauptanschlüssen. Im I. Quadranten sind die Kennlinien für die Schaltrichtung (auch Vorwärtsrichtung) dargestellt. Solange der Thyristor nicht gezündet ist, fließt nur ein kleiner Blockierstrom. Bei steigender Spannung steigt der Blockierstrom zunächst fast gar nicht an. Erst beim Erreichen einer bestimmten Spannungshöhe kommt es zu einer lawinenartigen Paarbildung von Ladungsträgern. Das Resultat – der Thyristor wird leitend. Der Wert der in Bild 1.3 gezeigten Durchlaßspannung liegt in den meisten Fällen zwischen 1 V und 2 V. Um diese Spannung wird die Lastspannung verringert, was besonders bei Niederspannungsschaltungen zu beachten ist. Weiterhin ist die Durchlaßspannung an der im Kristall des Thyristors entstehenden Verlustleistung beteiligt. Das Produkt aus Durchlaßspannung und Durchlaßstrom $u_F \cdot i_F$ ergibt den Momentanwert der Verlustleistung. Die Spannung, bei der der Thyristor bei offener Steuerstrecke (Steuerstrom = 0 A!) in den leitenden Zustand übergeht, wird als *Nullkippspannung* bezeichnet. Bei geschlossenem Steuerkreis und beim Fließen eines Zündstroms über die Steuerstrecke kann man feststellen, daß mit wachsendem Steuerstrom die Kippspannung kleiner wird.

Die Kennlinie im III. Quadranten ergibt sich, wenn man den Pluspol der Spannung an die Katode und den Minuspol an die Anode legt. Der Thyristor wird hierbei in Sperrichtung betrieben. Deshalb wird auch die Kennlinie im III. Quadranten als *Sperrkennlinie* bezeichnet. Der Sperrstrom ist, wie der Blockierstrom, sehr klein und steigt bei Erhöhung der Spannung kaum an. Erst beim Erreichen der Durchbruchspannung steigt der Sperrstrom (auch Rückstrom) steil an. Der steile Sperrstrom begrenzt die Sperrfähigkeit des Thyristors. Um einen sicheren Betrieb des Thyristors zu gewährleisten, ist die in den Kenndatenblättern der Thyristoren angegebene maximale nichtperiodische Spitzensperrspannung um einen bestimmten Sicherheitsabstand kleiner als die Durchbruchspannung zu wählen. Nach dem Durchschalten liegt die Spannung dann fast völlig am Lastwiderstand, der auch den Durchlaßstrom bestimmt. Damit der gezündete Thyristor auch leitend bleibt, darf der Durchlaßstrom nicht unter einen bestimmten Wert, in den Datenblättern mit *Haltestrom* bezeichnet, sinken. Unterschreitet aus irgendeinem Grunde der Haltestrom den angegebenen Wert, fällt der Thyristor in den Blockierzustand zu-

rück. Es muß bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß ein Zünden des Thyristors durch Überschreiten der Nullkippspannung unzulässig ist.

1.4. Zünden des Thyristors

Der Begriff *Zünden* wurde für die Thyristoren von den Thyratrons übernommen. Um einen Thyristor zu zünden, d. h., um seinen Durchlaßzustand zu erreichen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Thyristoren werden in der Praxis fast ausschließlich durch einen Zündimpuls, den man zwischen Steuerelektrode und Katode anlegt, gezündet. In Abschnitt 1.2. wurde bereits der Mechanismus des Leitendwerdens eines Thyristors erläutert. Bei Einleitung des Zündvorgangs ist zunächst die Stromverteilung innerhalb der Kristallschicht sehr ungleichmäßig. Zuerst sind nur die Bahngebiete in unmittelbarer Nähe der Steuerelektrode leitend. Von hier aus breiten sich dann die Ladungsträger in der übrigen Kristallschicht aus. Es werden Ausbreitungsgeschwindigkeiten von 0,05 bis 0,5 mm/μs angegeben.
Die Ladungsträgerausbreitung ist u. a. auch von der Kristalltemperatur abhängig. Deshalb sind die in den Thyristor-Datenblättern angegebenen Werte für den oberen Zündstrom und für die obere Zündspannung als Mindestwerte unbedingt einzuhalten. Nur so wird es möglich sein, alle Exemplare eines Thyristortyps auch bei niedrigen Betriebstemperaturen einwandfrei zu zünden. Auf jeden Fall muß der Zündstrom so lange vorhanden sein, bis der Hauptstrom den Wert des Haltestroms erreicht bzw. überschritten hat. Im wesentlichen hängt die zeitliche Dauer des Zündimpulses (Zündimpulsbreite) von den Eigenschaften des Lastkreises ab. Bei reiner ohmscher Last und steil ansteigendem Laststrom genügt bereits ein Zündimpuls mit geringer Breite. Bei induktiver Belastung muß die Zündimpulsbreite wesentlich größer sein, da hierbei durch die Induktivität eine Verzögerung des Laststroms auftritt. In Bild 1.4 sind diese Beziehungen dargestellt. Zündschaltungen selbst werden in Abschnitt 2. näher beschrieben.
Nun noch kurz zu anderen Möglichkeiten der Zündung eines Thyristors. Erhöht man bei offener Steuerelektrode die angelegte Anoden-Katoden-Spannung, so steigt der Strom zunächst nicht

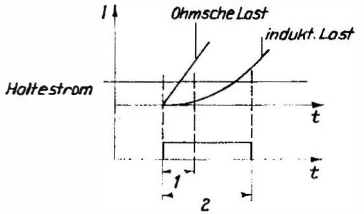


Bild 1.4 Zündimpulsbreite bei unterschiedlichen Laststromanstiegen;
1 — Zündimpulsbreite bei ohmscher Belastung,
2 — Zündimpulsbreite bei induktiver Belastung

bzw. nur sehr gering an (s. Bild 1.3). Erst im höheren Spannungsbereich wird dann mit einsetzendem Lawinenstrom die Stromkurve immer steiler. Die Spannung, bei der der Thyristor in den leitenden Zustand übergeht, wird als Nullkippspannung bezeichnet (bei offenem Steuerkreis). Da die Höhe der Nullkippspannung ebenfalls stark von der Temperatur abhängig ist – mit steigender Temperatur sinkt die Nullkippspannung –, bedeutet das, daß bei Überschreiten der zulässigen Temperaturgrenze die Blockierfähigkeit des Thyristors stark abnimmt. Ein Zünden durch Überschreiten der Nullkippspannung sollte stets vermieden werden, weil sonst durch hohe örtliche Feldstärken an der Elementeoberfläche Überschläge entstehen können, die den Thyristor unter Umständen zerstören.

Eine weitere Möglichkeit, den Thyristor zu zünden, ergibt sich, wenn die in Schaltrichtung angelegte Spannung einen sehr steilen Anstieg du/dt hat. Näheres dazu in Abschnitt 1.5.2.

Der benötigte Zündstrom eines Thyristors ist sehr viel kleiner als der Durchlaßstrom. Aus einer für jeden Thyristor charakteristischen Zündkennlinie kann man die Abhängigkeit von Zündspannung und Zündstrom (auch Steuerspannung und Steuerstrom) ablesen. Der Zündstrom hat in den meisten Fällen einen großen Streubereich. Die statischen Zündkennwerte sind außer von der Temperatur auch von der zwischen Anode und Katode anliegenden Spannung abhängig. Besonders bei Parallelbetrieb von Thyristoren ist der Einfluß der Anoden-Katoden-Spannung zu beachten. In diesem Fall ist es so, daß der zuerst gezündete Thyristor seine Durchlaßspannung dem parallelgeschalteten Thyristor als Anoden-Katoden-Spannung aufzwingt und daß durch einen zu hohen statischen Zündstrom die Thyristoren nicht mehr zünden. Wird aber der erforderliche Zündstrom nicht ganz er-

reicht, so ist auch die Einschaltbedingung nicht erfüllt, und der Thyristor zündet ebenfalls nicht. Ansonsten gilt für die Parallelschaltung von Thyristoren das bereits in Abschnitt 1. Gesagte.

1.5. Eigenschaften des Thyristors

1.5.1. Einschaltzeit

Das Einschaltverhalten eines Thyristors wird durch seine Einschaltzeit t_E charakterisiert (s. Bild 1.5). Sie setzt sich aus 2 Komponenten, der Einschaltverzugszeit t_V und der Stromanstiegszeit t_A, zusammen. Die Einschaltverzugszeit ist als die Zeit definiert, die zwischen dem Beginn eines sehr steilen Zündimpulses und dem Anstieg des Durchgangsstroms auf 10% seines Endwerts vergeht. Die Stromanstiegszeit ist die Zeit, in der der Durchgangsstrom von 10% bis auf 90% seines Endwerts ansteigt. Die Einschaltverzugszeit läßt sich durch Steilheit und Höhe der Zündimpulse beeinflussen. Dagegen kann die Stromanstiegszeit nicht über die Steuerelektrode beeinflußt werden.

1.5.2. Spannungsanstiegsgeschwindigkeit

Wird, wie bereits in Abschnitt 1.4. angedeutet, an einen im blokkierten Zustand befindlichen Thyristor eine in Schaltrichtung (auch Vorwärtsrichtung) gepolte Gleichspannung angelegt, so steigt die Spannung an der Anode und Katode steil an. Dieser steile Spannungsanstieg du/dt erfolgt ebenfalls, wenn der Thy-

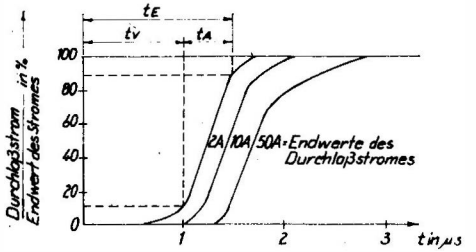


Bild 1.5 Einschaltvorgang

ristor an die Netzwechselspannung im Moment des Scheitelwerts der positiven Halbwelle angeschlossen wird. Jede Sperrschicht von Halbleiterbauelementen hat bekanntlich einen bestimmten Kapazitätswert (abhängig von der Breite der Sperrschicht). Der über diese Sperrschichtkapazität fließende Ladestrom ist der Anstiegsgeschwindigkeit der Spannung nach folgender Gleichung proportional:

$$I = C \cdot \mathrm{d}u/\mathrm{d}t\,.$$

Ist der Strom groß genug, dann hat er die gleichen Eigenschaften wie der über die Steuerelektrode fließende Zündstrom. Das bedeutet also, daß durch eine zu große Spannungsanstiegsgeschwindigkeit $\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$ der Thyristor ebenfalls gezündet wird. In der Regel wird aber ein Zünden ohne Zündimpuls bei einem $\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$-Wert $\leqq 20\ \mathrm{V}/\mu\mathrm{s}$ vermieden. Eine zu große Spannungsanstiegsgeschwindigkeit kann man durch einen zum Thyristor parallelgeschalteten Kondensator begrenzen, der zusammen mit den Zuleitungsinduktivitäten ein Verzögerungsglied bildet. Weiterhin läßt sich das $\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$-Verhalten durch Beschaltung der Steuerelektrode mit Widerständen und Kondensatoren oder durch eine niederohmige Steuerstromquelle einigermaßen verbessern. Bei einigen neueren Thyristortypen wird durch Maßnahmen bei der Herstellung ein günstigeres $\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$-Verhalten erzielt. Bei diesen Typen ist aber ein höherer Steuerstrom erforderlich.

1.5.3. Stromanstiegsgeschwindigkeit

Die Stromanstiegsgeschwindigkeit $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ ist für den Thyristor ein sehr wichtiger und stets zu beachtender Wert. Nach dem Zünden des Thyristors fällt die in Schaltrichtung anliegende Spannung nach einer Zeitfunktion auf die Durchlaßspannung ab. Bei sehr steilem Stromanstieg, besonders auch bei hohen Frequenzen, können für kurze Zeit erhebliche Schaltverlustleistungen auftreten. Diese höheren Verluste führen zu einer unzulässigen Erhitzung der Kristallschichten der Thyristortablette und damit zu einer allmählichen oder aber auch sofortigen Zerstörung des Thyristors. Beim Zündvorgang wird zunächst nur eine sehr kleine, in unmittelbarer Nähe des Zündkontakts liegende Fläche leitend. Die gesamte Fläche wird erst nach Ablauf einer endlichen

Zeit leitend. Diese Zeitspanne ist abhängig von der Größe und vom inneren Aufbau des Kristalls. Ein großer di/dt-Wert hätte somit nicht unerhebliche Stromdichten zur Folge, die zur thermischen Überlastung der Kristalltablette und schließlich zur Zerstörung des Thyristors führen. Im Mittel liegt der höchstzulässige di/dt-Wert bei 20 A/μs. Bei kleineren Stromscheitelwerten können größere Stromanstiegsgeschwindigkeiten zugelassen werden, da der zunächst kleine zur Verfügung stehende leitende Teil der Thyristortablette geringe Ströme ohne Zerstörung führen kann. Weiterhin sind kleinere Thyristortypen durch eine zu hohe Stromanstiegsgeschwindigkeit weniger gefährdet als die großen Typen. Das läßt sich darauf zurückführen, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Leitfähigkeit innerhalb der Kristallschicht fast immer gleich ist. Größere Thyristortypen beanspruchen somit einen längeren Zeitraum, bis die gesamte Kristallschicht leitend ist.

1.5.4. Ausschaltvorgang

Ein gezündeter Thyristor läßt sich nicht mehr durch die Steuerelektrode beeinflussen. Lediglich bei Exemplaren mit sehr geringen Durchlaßströmen ist das eventuell möglich. Um einen gezündeten Thyristor wieder zu *löschen*, muß der Stromfluß unterbrochen bzw. kurzzeitig unter den Wert des Haltestroms gesetzt werden. Der Thyristor erlangt nach einer Stromunterbrechung nicht sofort seine volle Sperrfähigkeit wieder. Es vergeht eine bestimmte Zeit (10 ... 100 μs), bis die überschüssigen Ladungsträger durch Rekombination verschwunden sind. Durch Anlegen einer negativen Sperrspannung kann man einen Teil der gespeicherten Ladungsträger „absaugen" und damit die volle Sperrfähigkeit des Thyristors früher erreichen. In Bild 1.6 ist der Ausschaltvorgang dargestellt. Während des Ausschaltvorgangs sind zwei Zeiten von besonderem Interesse. Die Sperrverzögerungszeit t_V und die Freiwerdezeit t_F. Unter der *Sperrverzögerungszeit* versteht man die Zeit, die zwischen Stromnulldurchgang und Sperrspannungsübernahme vergeht. Der Rückstrom hat in diesem Augenblick sein Maximum erreicht. Er fällt dann, zunächst recht steil, auf den statischen Sperrstrom ab. Durch die große Änderungsgeschwindigkeit des Rückstroms während der

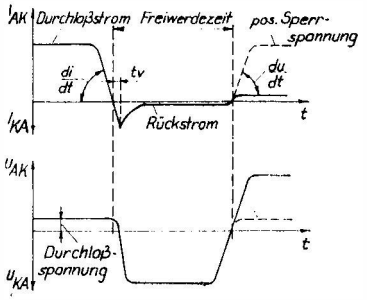


Bild 1.6 Ausschaltvorgang

Übernahme der Sperrspannung entstehen in den Induktivitäten des Kommutierungskreises Überspannungen am Thyristor, die zur Zerstörung des Halbleiterbauelements führen können. Durch *RC*-Beschaltung lassen sich diese Überspannungen begrenzen. Unter der *Freiwerdezeit* eines Thyristors versteht man die Zeit, die nach dem Nulldurchgang des Stromes vergeht, bis der Thyristor wieder seine volle Sperrfähigkeit in Schaltrichtung erreicht hat. Nach der Freiwerdezeit, die hauptsächlich von der Konstruktion des Thyristors bestimmt wird, richtet sich die Arbeitsfrequenz, mit der der Thyristor betrieben werden kann. Im Mittel liegt die Freiwerdezeit bei 10 bis 100 μs. Bei speziellen Sonderausführungen, den sogenannten Frequenzthyristoren, werden sogar Freiwerdezeiten von etwa 5 μs angegeben.

1.5.5. Thermische Eigenschaften

Beim Thyristor sind fast ausschließlich alle Kenndaten stark von der Temperatur abhängig. Besonders zu beachten ist dabei, daß der Thyristor von einer bestimmten Sperrschichttemperatur an seine Sperrfähigkeit verliert. Deshalb muß die in der Sperrschicht erzeugte Verlustleistungswärme schnell nach außen abgeführt werden. Das bedeutet, daß bei allen Thyristorschaltungen besonders auf eine sehr gute Kühlung und richtige Strombelastung zu achten ist.

Das Wärmeableitungsvermögen eines Thyristors von seiner Sperrschicht zum Gehäuseboden hin bezeichnet man als *thermischen*

Innenwiderstand R_{thi}. Man versteht darunter das Verhältnis der Differenz von Sperrschichttemperatur ϑj und Gehäusetemperatur ϑ_c zur Verlustleistung

$$R_{thi} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_c}{P_V};$$

R_{thi} in °C/W.

Um möglichst schnell die entstehende Wärme des Gehäuses an die Umgebung (mit der Temperatur ϑ_a) abzuführen, wird für jeden Thyristortyp ein entsprechender Kühlkörper verwendet. Damit die Wärme in kürzester Zeit vom Thyristor auf die Kühlfläche bzw. den Kühlkörper übergehen kann, soll der Kühlkörper einen kleinen thermischen Austauschwiderstand R_{tha} haben. Man versteht unter dem thermischen Austauschwiderstand das Verhältnis der Differenz von Kühlkörpertemperatur ϑ_K und Umgebungstemperatur ϑ_a zur Verlustleistung

$$R_{tha} = \frac{\vartheta_K - \vartheta_a}{P_V};$$

R_{tha} in °C/W.

Die Oberfläche des Kühlkörpers sollte möglichst groß sein. Er muß so konstruiert sein, daß von der Befestigungsstelle des Thyristors bis zu den Rändern des Kühlkörpers keine Temperaturdifferenzen auftreten. Bei den beschriebenen Schaltungen sind Kühlbleche mit einer Fläche von 25 bis 100 cm² völlig ausreichend (je nach Thyristortyp und Belastung). Die dafür verwendeten Al-Bleche sollten eine Stärke von etwa 2 mm bis 3 mm haben.

1.6. Schutzmaßnahmen

Wie alle Halbleiterbauelemente, so sind auch die Thyristoren vor zu hohen Spannungs- bzw. Strombeanspruchungen zu schützen. Das gilt nicht nur für den Hauptstromkreis (Anode/Katode), sondern auch für den Steuerkreis.

1.6.1. Überspannungsschutz

Befindet sich im Laststromkreis ein induktiver Verbraucher, so treten beim Löschen des Thyristors an diesem Verbraucher relativ

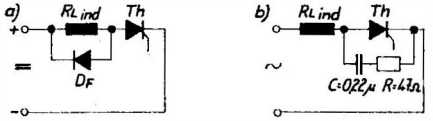


Bild 1.7 Schutzbeschaltung eines Thyristors;
a — mit Freilaufdiode, b — mit einer *RC*-Kombination im Wechselstromkreis

hohe Induktionsspannungen auf. Solche Induktionsspannungen liegen in den meisten Fällen weit höher als die Betriebsspannung, was somit eine äußerste Gefährdung für den Thyristor bedeutet und oftmals zu seiner Zerstörung führt. Durch geeignete Schutzbeschaltungen ist es nun möglich, den Thyristor vor diesen unerwünschten Spannungsspitzen zu schützen. Eine Möglichkeit besteht darin, dem induktiven Verbraucher eine in Sperrichtung gepolte Diode parallel zu schalten, damit sich die Induktionsspannung über diese abbauen kann (s. Bild 1.7a). Diese Schutzmöglichkeit wird angewendet, wenn die Betriebsspannung eine Gleichspannung ist. Dabei muß man bei der Auswahl dieser Diode, auch *Freilaufdiode* genannt, darauf achten, daß der Wert des Durchlaßstroms dem Laststrom entspricht.
Eine zweite Möglichkeit, die auch häufig angewendet wird, ist die Beschaltung des Thyristors mit einer RC-Kombination (s. Bild 1.7b). Diese Schutzbeschaltung wendet man besonders dann an, wenn als Betriebsspannung eine Wechselspannung vorhanden ist und damit der Einsatz einer Diode zwangsläufig illusorisch würde. Der Kondensator soll die gesamte zum Zeitpunkt des Sperrstromspitzenwerts in den Induktivitäten des Stromkreises gespeicherte Energie aufnehmen. Um die durch die Entladung des Kondensators beim Einschalten des Thyristors entstehenden Einschaltverluste niedrig zu halten, schaltet man in Reihe mit dem Schutzkondensator einen Widerstand zur Begrenzung des Einschaltstroms auf den höchstzulässigen Wert. Da im Beschaltungswiderstand erhebliche Wärmemengen auftreten können, muß man besonders seine Belastbarkeit beachten. Selbstverständlich ist es möglich, die Werte für den Kondensator und für den Widerstand zu berechnen. Die in Bild 1.7 genannten Werte haben sich als günstig erwiesen, so daß auf die Darstellung der Berechnung verzichtet werden soll. Es wird empfohlen, das RC-Schutzglied

in unmittelbarer Nähe des jeweiligen Thyristors anzubringen. Dabei ist weiterhin zu beachten, daß die oft erheblichen Wärmemengen schnell und ohne Schaden für den Thyristor abgeführt werden. Für eine Schutzbeschaltung sind leistungsstarke und zuverlässige Bauelemente zu verwenden.

1.6.2. Überstromschutz

Bei der Anwendung von Thyristoren kann es vorkommen, daß kurzzeitig Laststromspitzen auftreten, die den zugelassenen Nennstrom des Thyristors überschreiten. Einige Thyristorhersteller geben in ihren Datenblättern u. a. auch Überstromkennlinien für Thyristoren an. Aus diesen Kennlinien kann man ersehen, welche Überströme auftreten dürfen und für welche Zeitdauer. Die höchste Belastung eines Thyristors tritt im Kurzschlußfall auf. Hier muß der Thyristor durch äußerst schnell ansprechende Sicherungen abgeschaltet werden. Dafür werden überflinke Sicherungen, strombegrenzende Einrichtungen und Schnellschalter verwendet. Gegen länger anstehende Überströme wendet man thermische Stromauslöser an, die so eingestellt werden, daß bei etwa 1,2fachem Überstrom der Auslöser nach etwa 20 Minuten anspricht.

1.6.3. Schutzbeschaltung der Steuerelektrode

Auch die Steuerelektrode kann durch zu hohe Werte der Steuerspannung bzw. des Steuerstroms gefährdet werden. In den meisten Fällen reicht ein Vorwiderstand zur Strombegrenzung aus. Er ist nach dem Ohmschen Gesetz so zu berechnen, daß bei gegebener Anschlußspannung der obere Zündstrom erreicht wird. Diese Art der Schutzbeschaltung der Steuerelektrode wendet man besonders dann an, wenn nur positive Zündimpulse anliegen. Treten auch negative Zündimpulse auf, die in der Regel 4 V nicht überschreiten sollten, so schaltet man zwischen Steuerelektrode und Katode des Thyristors eine Diode. Die Katodenseite der Diode wird dabei an die Steuerelektrode des Thyristors gelegt. Bei zu hohen negativen Steuerimpulsen kann es sonst zu einem Durchbruch der Strecke Steuerelektrode/Katode kommen.

2. Zündschaltungen

Die prinzipiellen Probleme beim Zünden eines Thyristors wurden bereits in Abschnitt 1.4. behandelt. Bevor unter 3. und 4. Anwendungsmöglichkeiten beschrieben werden, seien noch grundsätzliche Zündschaltungen für Thyristoren vorangestellt. Weiterhin soll an Hand von Beispielen die praktische Ausführung von Zündschaltungen gezeigt werden. Es kommen, je nach der Form des an die Steuerelektrode geführten Signals, im wesentlichen drei Zündmethoden zur Anwendung. Es kann sich dabei um eine Zündung mit Gleichspannung, Wechselspannung oder mit einer impulsförmigen Spannung handeln.

2.1. Gleichspannungszündung

In Bild 2.1 sind einige Möglichkeiten einer Gleichspannungszündung gezeigt. Über den Schalter S1 wird unter Vorschaltung eines Widerstands *R*1 zur Begrenzung des Zündstroms die Gleichspannung direkt an die Steuerelektrode gelegt. Die Zündgleichspannung kann entweder aus einer besonderen Gleichspannungsquelle (s. Bild 2.1a) oder direkt aus der Betriebsspannung (s. Bild 2.1b) gewonnen werden. Ist bei Anwendung des letztgenannten Falls die Betriebsspannung eine Wechselspannung, so muß man in den Steuerkreis eine Diode schalten. Die Diode verhindert bei der negativen Halbwelle der Wechselspannung, daß zur Zündelektrode negative Halbwellen gelangen. Um den Thyristor wieder

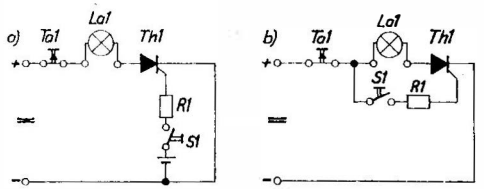


Bild 2.1 Zündung eines Thyristors mit Gleichspannung

in den Blockierzustand zu versetzen, d. h., um ihn zu löschen, muß der Anodenstrom unterbrochen werden. Das kann durch die angedeutete Taste Ta1 geschehen.

2.2. Wechselspannungszündung

In Bild 2.2 sind einige Möglichkeiten für eine Wechselspannungszündung dargestellt. Dem Steuerkreis kann die Wechselspannung über einen Transformator oder direkt zugeführt werden. In beiden Fällen ist noch eine Diode D1 und ein Widerstand *R*1 zur Begrenzung des Zündstroms vor der Steuerelektrode angeordnet. Auch hier verhindert die Diode, daß die negative Halbwelle an die Steuerelektrode des Thyristors gelangt.
Bei der in Bild 2.2 dargestellten Zündungsart wird der Thyristor nicht sofort, sondern immer erst kurz nach Beginn der positiven Halbwelle gezündet. Man hat sogar die Möglichkeit, bei unterschiedlicher Auslegung des Begrenzerwiderstands *R*1 den Zündzeitpunkt zu verschieben. Vergrößert man z. B. *R*1, so wird zwangsläufig der Wert des Steuerstroms geringer. Der erforderliche Zündstrom wird also erst zu einem späteren Zeitpunkt mit steigender positiver Halbwelle erreicht. In Bild 2.3 ist der Einfluß des Widerstands im Steuerstromkreis auf den Durchlaßstrom des Thyristors dargestellt.
Mit dieser einfachen Schaltung läßt sich bereits der Zeitpunkt des Zündens um etwa 90°. verschieben. Da durch Veränderung des Begrenzerwiderstands der Steuerstrom nach oben oder unten, also vertikal, verändert werden kann, spricht man von einer Vertikalsteuerung, die einen Sonderfall der Phasenanschnittsteuerung darstellt.

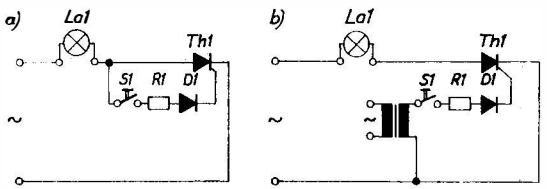


Bild 2.2 Zündung eines Thyristors bei Wechselspannungsbetrieb

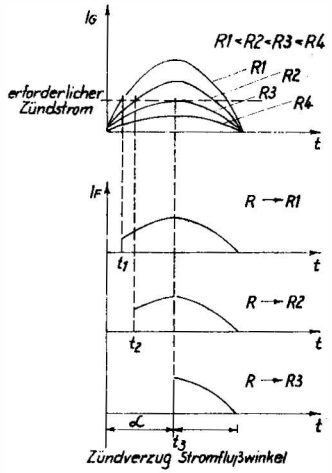


Bild 2.3 Einfluß eines Widerstands im Steuerkreis eines Thyristors auf den Durchlaßstrom (I_F)

2.3. Impulszündung

Eine Ansteuerung des Thyristors mit steilen und schmalen Zündimpulsen bringt Vorteile. So ist es möglich, mit der Impulszündung den Thyristor sicher und genau zu dem jeweiligen gewünschten Zündzeitpunkt zu zünden. Auch sollte die Amplitude des Impulses möglichst groß sein. Man erreicht dadurch, daß ein großer Flächenanteil der Sperrschicht in kürzester Zeit leitend wird. Gleichzeitig werden damit die Schaltverluste klein gehalten. In Bild 2.4 sind typische Impulszündschaltungen dargestellt. Bild 2.4a zeigt eine Impulszündschaltung in Form einer Brückenschaltung. Im Diagonalzweig der Brücke befindet sich eine aus 2 Transistoren gebildete Verstärkereinrichtung mit Kippverhalten. Dadurch wird eine Triggerung des Thyristors erreicht. Zeitbestimmend für die gesamte Anordnung sind $C1$ und $R4$. Durch $C1$ wird bewirkt, daß an Transistor T1 die Spannung am Emitter gegenüber der Basisspannung nacheilt. Je nachdem, wie groß $R4$ gewählt wurde, eilt die Spannung mehr oder weniger nach. Zunächst sei angenommen, daß am Anfang der ersten Hälfte der Halbwelle der Transistor T1 über die Basis-Emitter-Strecke keinen Strom führt. Erst bei Nulldurchgang der Brückendia-

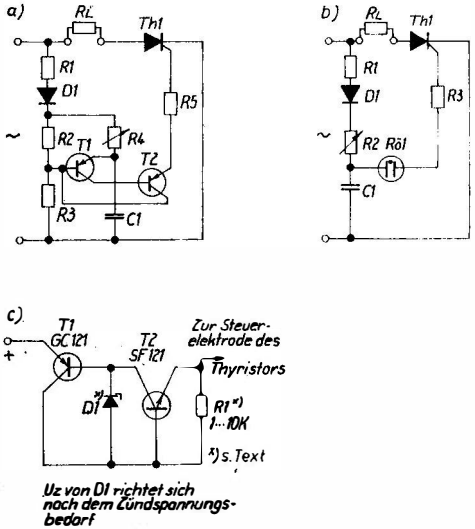


Bild 2.4 Typische Impulszündschaltungen; a - Brückenschaltung, b - mit Glimmlampe als Triggerelement, c - Anwendungsbeispiel mit Transistoren

gonalspannung, d. h. also bei Umkehrung der Polarität, beginnt in T1 ein Basisstrom zu fließen. Beide Transistoren werden übersteuert, und $C1$ entlädt sich über $R5$ und über die Steuerelektrode des Thyristors – der Thyristor wird gezündet. Beim Nulldurchgang der Sinushalbwelle wird der Thyristor wieder gelöscht, da zu diesem Zeitpunkt der Haltestrom unterbricht.

Sehr gebräuchlich sind auch Impulszündschaltungen, für die als Triggerelement eine Glimmlampe verwendet wird. Das obengenannte RC-Glied zur Bestimmung des Zündzeitpunktes kann entfallen, da Glimmlampen definierte Ansprech- bzw. Zündspannungen haben, die dann zur Festlegung des Zündzeitpunkts ausgenutzt werden. Eine Impulszündschaltung mit einer Glimmlampe als Triggerelement ist in Bild 2.4c dargestellt. Mit $R2$ läßt sich der Zündzeitpunkt der Glimmlampe verändern und damit auch der Zündzeitpunkt des Thyristors. Durch $C1$ wird bewirkt, daß ein genügend großer Impuls des Zündstroms zur Verfügung

steht. Ist $R2$ sehr niederohmig, so kann $C1$ eventuell entfallen. Der Kondensator $C1$ beeinflußt ebenfalls den Stromflußwinkel bzw. den Zündverzug. Mit einem Kondensator sind Stromflußwinkel $< 90°$ und Werte des Zündverzugs $> 90°$ zu erreichen, während ohne Kondensator der Stromflußwinkel $= 90°$ gewählt werden kann. Auf einen Umstand sei allerdings noch hingewiesen. Impulszündschaltungen mit Glimmlampen arbeiten oft nicht stabil genug. Durch äußere Einflüsse, wie Temperaturschwankungen oder sehr unterschiedliche Veränderung der Lichtverhältnisse in unmittelbarer Umgebung der Glimmlampe, kann sich der Zündpunkt der Glimmlampe verschieben. Das ist besonders bei solchen Schaltungen zu beachten, bei denen es auf hohe Zeitgenauigkeit ankommt. Ein weiterer Nachteil bei Zündschaltungen mit Glimmlampe ist der, daß sich wegen der oft sehr hohen erforderlichen Zündspannung eine nicht unerhebliche Einschränkung des Regelbereichs ergibt.

Preisgünstige und einfache Zündschaltungen lassen sich mit Transistoren aufbauen. In Bild 2.4c ist eine solche Schaltung nach [28] abgebildet, die für Rö1 in die Schaltung nach Bild 2.4b eingesetzt werden kann. Diese Schaltungen lassen sich bereits mit Bastlertransistoren aufbauen. Die β-Werte der Transistoren sollten nicht zu hoch sein (etwa 30 ... 90). Mit der Z-Diode wird die gewünschte Zündspannung festgelegt. Ein 250-mW-Typ dürfte dabei völlig ausreichend sein. Der Widerstand $R1$ kann eventuell entfallen. Er bewirkt die Reststromkompensation (nur bei Ge-Typen), falls die Schaltung bereits unterhalb der Z-Diodenspannung zündet. Ein weiteres Beispiel einer Zündschaltung mit Transistoren zeigt z. B. Bild 4.12.

Neuerdings verwendet man als Zündhilfe symmetrische Halbleiter-Schaltdioden, auch *Diac* genannt. In der DDR werden z. Z. Diacs vom Typ *KR 205*, *KR 206* und *KR 207* (ČSSR) verwendet. Sie werden prinzipiell in Kombination mit einem Widerstand ebenfalls in die Gatezuleitung des Thyristors geschaltet.

2.4. Anwendungsbeispiele für Zündschaltungen

Die nachstehend beschriebenen Zündschaltungen sind Impulszündschaltungen. Die Thyristoren werden jeweils durch zeitbestimmende Glieder angesteuert. Es soll eine Zündschaltung mit

Phasenanschnittsteuerung und eine Schaltung zur Ansteuerung von antiparallelgeschalteten Thyristoren betrachtet werden.

2.4.1. Phasenanschnittschaltung für einen Stromflußwinkel von 90°

Prinzipiell kann man von allen Phasenanschnittschaltungen sagen, daß ihr Vorteil in der hohen Schaltfolge und in der nahezu verlustlosen Leistungsregelung liegt. Elektrische Maschinen, Glüh- und Leuchtstofflampen u. a. m. können somit stufenlos geregelt werden, ohne daß sich das ständige Zu- und Abschalten des Thyristors irgendwie störend bemerkbar machen würde. Die beschriebene Schaltung eignet sich besonders dann, wenn die Leistung eines Verbrauchers um einen bestimmten Betrag verringert werden soll. Der Schaltungsaufbau selbst ist einfach und in Bild 2.5 dargestellt. Wird die Schaltung direkt mit Wechselspannung betrieben, fallen von vornherein sämtliche negativen Halbwellen weg. Die maximal zu erzielende Leistung beträgt deshalb auch nur 50% von der bei Vollwellenbetrieb. Will man z. B. die in einem Widerstand (Heizung, Lötkolben o. ä.) umgesetzte Leistung von 60 W auf ein Viertel, also auf 15 W verringern, dann müßte der Thyristor so angesteuert werden, daß er genau bei 90° zündet. $R2$ ist deshalb so zu variieren, daß gerade der notwendige Zündstrom erreicht wird (s. auch Bild 2.3). Man mißt den Verbraucherstrom und gleicht $R2$, der einige zehn Ohm beträgt, so ab, daß ein entsprechend der gewünschten Leistungsminderung erforderlicher Strom fließt. Bei bekanntem Verbraucherwiderstand R_L kann man nach der Beziehung

$$I = \sqrt{\frac{P_V}{R_L}}$$

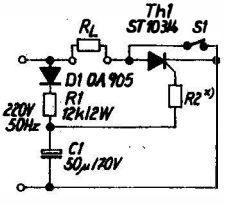


Bild 2.5 Phasenanschnittschaltung zur verlustlosen Leistungsregelung, *) Erläuterung siehe Text

den erforderlichen Strom berechnen. In Betrieb genommen wird die Schaltung durch Öffnen des Schalters S1. Das kann durch einen üblichen Schalter von Hand oder aber auch über den Kontakt eines Zwischenrelais (das z. B. bei einer Raumheizung von einem Kontaktthermometer angesteuert wird) oder von einem anderen beliebigen Kontakt geschehen. Es läßt sich auf diese Weise beispielsweise die aufgenommene Leistung eines Lötkolbens bei Lötpausen (S1 offen) um einen bestimmten Betrag verringern. Zu beachten ist dabei besonders die Belastbarkeit des Kontakts von S1; denn es fließt der gesamte Laststrom über diesen Kontakt! Nach dem Öffnen von S1 beginnt sich $C1$ über $D1$ und $R1$ aufzuladen. Hat $C1$ die erforderliche Zündspannung des Thyristors erreicht, zündet dieser. Wie bereits erwähnt, wird mit $R2$ der Stromflußwinkel eingestellt. Wer die zu reduzierende Leistung veränderlich haben möchte, kann selbstverständlich $R2$ als niederohmigen Regelwiderstand ausführen.
Bei ungenügender Kühlung des Thyristors kommt es zu einer Verschiebung des Zündzeitpunkts und somit auch zu einer Veränderung der zu reduzierenden Verbraucherleistung. Es ist empfehlenswert, die Schaltung hauptsächlich dort einzusetzen, wo keine großen Genauigkeitsforderungen gestellt werden.

2.4.2. Schaltung zur Ansteuerung antiparallelgeschalteter Thyristoren

Nicht selten kommt es vor, daß antiparallelgeschaltete Thyristoren gezündet werden müssen. Für einen solchen Anwendungsfall ist die Schaltung nach Bild 2.6 gedacht. Kernstück der Schaltung ist ein Sperrschwinger, der die Impulse zur Ansteuerung der beiden antiparallelgeschalteten Thyristoren liefert. Ist der Schalter S1 geöffnet, so wird der Transistor T2 leitend, so daß damit auch sofort die Thyristoren zünden und in der Folgezeit dann immer bei Beginn der jeweiligen Halbwelle. Mit dem Öffnen von S1 wird an die Basis von T2 eine Spannung gelegt. Diese Spannung ist so groß, daß T2 gerade durchsteuert. In der Wicklung $w1$ des Übertragers wird im Verhältnis $\frac{w1}{w4} = 1$ eine Spannung induziert, die so groß ist, daß T2 nun voll durchsteuert. Der Kollektor-

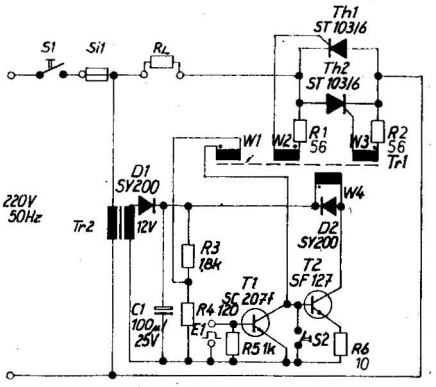


Bild 2.6 Ansteuerung antiparallelgeschalteter Thyristoren

strom steigt zunächst langsam an (induktive Wirkung von $w4$). Dann aber, im Gebiet der Sättigung, steigt der Strom recht schnell an. Der Spannungsabfall am Emitterwiderstand von T2 bewirkt eine Verringerung des Basisstroms. Die Folge ist, daß auch die Spannungen an $w1$ und $w4$ kleiner werden und T2 immer mehr sperrt. Bei Polaritätswechsel der Spannung setzt dann ein Stromfluß über die als Freilaufdiode fungierende Diode D2 ein, der damit den Transistor T2 vollkommen sperrt. Dieser Schaltzustand wird so lange aufrechterhalten, bis die gesamte gespeicherte Energie des Übertragers aufgebraucht ist. Danach beginnt der Vorgang wieder von vorn. Der zulässige Lastwiderstand richtet sich dabei nach den verwendeten Thyristortypen. Da in der ersten Halbwelle der eine und in der zweiten Halbwelle der andere Thyristor leitend ist, braucht jeder Thyristor nur für den halben Verbraucherstrom ausgelegt zu sein. Bei Verwendung von 2 Thyristoren des Typs *ST 103/...* können also Lastströme bis maximal 6 A fließen. An Stelle des Schalters S2 läßt sich auch eine elektronische Ansteuerung einsetzen. T2 wird dabei über T1 vom Eingang E1 angesteuert. Mit der an Eingang E1 liegenden Steuerschaltung lassen sich die Zündstromwinkel kontinuierlich und stets reproduzierbar einstellen.

Als Übertragerkern wird ein Schalenkern 22 × 13 aus *Manifer 163* mit einem A_L-Wert 2200 nH/n² des VEB Kombinat *Keramische*

Werke Hermsdorf benutzt (Zeichn.-Nr. *5135.4—4311.22/2200/163*). Selbstverständlich kann man auch andere Schalenkerne verwenden, nur müssen dann die Windungszahlen neu berechnet werden. Die Wicklungen *w*1 bis *w*4 haben alle jeweils 30 Windungen (Durchmesser 0,2-mm-CuL). In Bild 2.6 kennzeichnet der Punkt an den Wicklungen *w*1 bis *w*4 den Wicklungsanfang. Bei Nichtbeachtung arbeitet der Sperrschwinger nicht einwandfrei. Ist dies der Fall, sind die Anfänge der einzelnen Wicklungen und ihr richtiger Anschluß zu überprüfen. Gegebenenfalls sind die beiden Anschlüsse der betroffenen Wicklung zu tauschen. Als Spulenkörper wird ein Mehrkammerspulenkörper verwendet. Man achte besonders auf gute Isolation zwischen den einzelnen Wicklungen (Hauptaugenmerk auf *w*2 und *w*3 legen! Für mindestens 1 kV Stoßspannung bemessen)! *w*1 und *w*4 können ohne weitere Bedenken gemeinsam in einer Kammer untergebracht werden.

3. Anwendungsmöglichkeiten für Gleichstrom

3.1. Thyristorschalter

Thyristorschalter lassen sich mit einem äußerst geringen Aufwand an Bauelementen realisieren. Diese Thyristorschalter haben ganz allgemein einige Vorteile gegenüber den herkömmlichen Schaltern.

Da wären u. a. zu nennen:

- Wartungsfreiheit;
- erschütterungsfest;
- hohe Schaltgeschwindigkeit;
- keine Funkenbildung und damit kein Kontaktabbrand;
- kein Prellen der Kontakte;
- Schalten ohne Geräusche.

Neben diesen vielen guten Eigenschaften muß aber auch auf einen entscheidenden Nachteil solcher Schalter hingewiesen werden. Bei nichtleitendem Thyristor ist zwar der Stromfluß unterbrochen, der Verbraucher aber selbst liegt, zumindest mit einer Seite seines Anschlusses, noch am Netz. *Es erfolgt also keine galvanische Trennung vom Netz!* Das ist besonders bei Versuchsaufbauten, aber auch bei Wartungsarbeiten fertiger Geräte stets und ständig zu beachten! Bild 3.1 zeigt den Stromlaufplan eines Gleichstromschalters mit einem Thyristor. Diese Schaltung ist besonders dann geeignet, wenn größere Lastströme mit Schaltern geringer Kontaktbelastung (z. B. Mikrostößeltaster, Manometer bzw. Thermometer mit Kontakteinrichtung usw.) geschaltet werden sollen. In Betrieb gesetzt wird die Schaltung

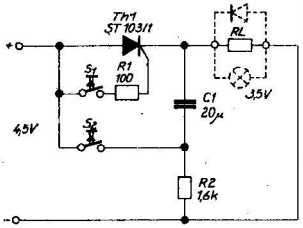


Bild 3.1 Thyristorschalter für Gleichstrom

durch Drücken der Taste S1. Über die Taste S1 und den Begrenzerwiderstand $R1$ fließt nun ein Strom zur Zündelektrode – der Thyristor wird gezündet. Damit beginnt auch der Laststrom zu fließen. Nach dem Zündvorgang kann man die Taste S1 wieder loslassen, denn der Thyristor bleibt auch weiterhin leitend. Sollte das nicht der Fall sein, so ist entweder der Laststrom geringer als der erforderliche Haltestrom des Thyristors, oder aber es steht keine reine Gleichspannung zur Verfügung. Denn bei pulsierender Gleichspannung verliert der Thyristor in dem Moment seine Leitfähigkeit, wenn sich die Spannungskurve der Nullinie nähert. Will man den Verbraucher wieder abschalten, gibt es mehrere Möglichkeiten. Durch Einbau eines Schalters oder Tasters im Laststromkreis läßt sich beispielsweise recht einfach der Laststrom unterbrechen. Wie schon erwähnt, wird dadurch der Thyristor gelöscht. Hierbei ist zu beachten, daß die zugelassene Kontaktbelastung des Schalters der Größe des Laststromes entspricht. Eine andere, vielleicht sogar elegantere Möglichkeit zum Löschen eines Thyristors besteht darin, daß man während des Betriebs einen Kondensator auf den Wert der Betriebsspannung auflädt. Der in Bild 3.1 dargestellte Löschkondensator $C1$ wird über den Widerstand $R2$ aufgeladen. Will man zu einem bestimmten Zeitpunkt die Schaltung außer Betrieb setzen, drückt man kurz auf die Taste S2. Im selben Moment wird die Spannung des Löschkondensators in Sperrichtung an den Thyristor gelegt. Die Folge ist, daß der Durchlaßstrom des Thyristors unter den Wert des Haltestroms sinkt. Der Laststromkreis wird unterbrochen – Th1 hat den Blockierzustand erreicht. Ist S2 geschlossen, so liegt an $R2$ die volle Betriebsspannung. Das ist hinsichtlich der auftretenden Verlustleistung bei der Dimensionierung des Widerstands zu beachten. Auf die Belastbarkeit muß auch, im Gegensatz zu S1, bei der Auswahl von S2 geachtet werden. Wird S2 geschlossen, so fließt über diesen Kontakt kurzzeitig ein nicht unerheblicher Strom. Es besteht auch die Möglichkeit, S2 durch einen weiteren Thyristor zu ersetzen.

Der Kondensator $C1$ muß so groß sein, daß für die Dauer der Freiwerdezeit von Th1 die Gegenspannung aufrechterhalten wird. Die Größe von $C1$ hängt vom Laststrom I_L, von der Kondensatorspannung U_C und von der Freiwerdezeit t_F ab.

Mit nachstehender Gleichung kann die Größe des Löschkondensators $C1$ ermittelt werden:

$$C1 = \frac{1{,}5 \cdot t_F \cdot I_{Lmax}}{U_C};$$

$I_{L\,max}$ – maximal auftretender Laststrom in Ampere, U_C – Kondensatorspannung in Volt, t_F – Freiwerdezeit in μs.
Die Freiwerdezeit ist aus den Datenblättern des jeweiligen Thyristortyps zu ersehen. Die 1,5 wird als Sicherheitsfaktor zur Freiwerdezeit benutzt.
Die Funktionsweise eines solchen Gleichstromschalters kann bereits mit einer üblichen Taschenlampenbatterie nach Bild 3.1 demonstriert werden. Ist der Lastwiderstand eine Induktivität, so muß zum Schutz des Thyristors vor Überspannungen eine Freilaufdiode parallel zur Last geschaltet werden (gestrichelt angedeutet). Die Werte für $R1$ schwanken je nach Thyristortyp (Zündstrombedarf!) zwischen 100 und 500 Ω. $R2$ liegt zwischen 1 und 1,6 kΩ. Der Wert des Löschkondensators liegt z. B. für den ČKD-Thyristor T 25 bei 30 μF.

3.2. Alarmschaltung

Um einen bestimmten Raum, einen Schrank (Schreibtisch) oder ein Kfz vor unbefugtem Eindringen zu schützen, eignet sich eine akustische Alarmanlage. Beim Öffnen der Tür soll jeweils ein akustisches (eventuell optisch kombiniert) Alarmsignal ausgelöst werden. Die beschriebene Schaltung arbeitet mit einem Thyristor. Man erkennt in dieser Schaltung das Prinzip des unter 3.1. beschriebenen Thyristorschalters wieder. Nur wird hier der Thyristor durch Unterbrechung des Laststroms gelöscht. Jeweils beim Öffnen des zu schützenden Raumes bzw. Gegenstands wird ein Kontakt (z. B. Türkontakt) geschlossen. In der Schaltung nach Bild 3.2 ist das der Schalter S1. Mit dem Schließen von S1 wird über $R1$ der Thyristor gezündet, der Laststrom beginnt über den geschlossenen Schalter S2 zu fließen, und ein akustisches Signal ertönt. Erst wenn S2 geöffnet wird, verstummt das Signal. Damit von befugten Personen vor dem Öffnen der Tür die Alarmanlage ausgeschaltet werden kann, ist es zweckmäßig, den Schalter S2 außerhalb des zu schützenden Raumes bzw. Gegenstands versteckt anzuordnen. Ist es nicht möglich, S2 außerhalb anzubringen, sollte das akustische Signal zeitverzögert ausgelöst

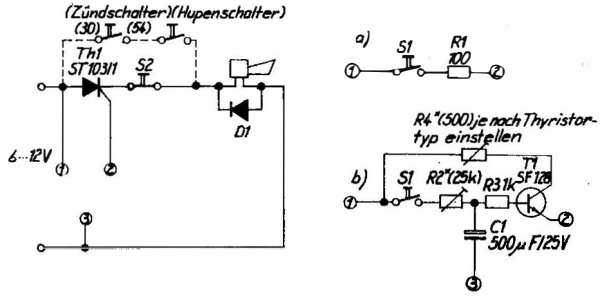


Bild 3.2 Alarmschaltung;
a — ohne Zeitverzögerung, b — mit Zeitverzögerung,
*) Erläuterungen siehe Text

werden, um dadurch ebenfalls genügend Zeit zum Öffnen von S2 zu haben. Bild 3.2b zeigt eine Schaltung zur Zeitverzögerung, die entsprechend in die Schaltung nach Bild 3.2 eingesetzt werden muß. Die Schaltung zur Zeitverzögerung arbeitet wie folgt. Der Zündbefehl für Th1 kommt auch hierbei wieder vom Schalter S1. Sofort nach dem Schließen des Schalters S1 lädt sich der Kondensator *C*1 über den Widerstand *R*2 auf. Benutzt man für *R*2, wie in Bild 3.2b dargestellt, einen veränderlichen Widerstand, so ist man in der Lage, den Aufladevorgang von *C*1 zu beschleunigen bzw. zu verlangsamen. Das heißt, man kann die Ansprechzeit der Schaltung den jeweiligen örtlichen Bedingungen anpassen. In den meisten Fällen genügt ein Widerstandswert bis zu 20 kΩ. Hat die Kondensatorspannung von *C*1 eine bestimmte Höhe erreicht, wird der Transistor T1 durchgeschaltet und der Thyristor Th1 somit zeitverzögert gezündet. Durch die Wahl eines anderen Kondensators für *C*1 läßt sich die Zündverzögerung ebenfalls in bestimmten Grenzen beeinflussen. Die Verzögerungszeit ist nun so groß – sie lag bei den durchgeführten Versuchen zwischen 5 bis 15 Sekunden –, daß man nach dem Öffnen des zu schützenden Raumes noch genügend Zeit hat, um den Schalter S2 zu betätigen und somit den Hupenstromkreis zu unterbrechen. Der Wert für *R*4 richtet sich nach dem Zündstrombedarf des verwendeten Thyristors. Für *R*4 genügt ein veränderlicher Widerstand von etwa 500 Ω. Auf jeden Fall ist *R*4 so einzustellen, daß der Thy-

ristor Th1 sicher gezündet wird. Die in Klammern gesetzten Zahlen und Begriffe gelten beim Einbau in ein Kfz.

3.3. Intervallschalter für Scheibenwischer

Die meisten Kraftfahrer empfinden es als sehr angenehm, wenn in ihrem Pkw die Geschwindigkeit bzw. die Bewegungshäufigkeit der Scheibenwischer mit einer einmaligen Einstellung so eingestellt werden kann, daß man eine optimale Anpassung an die jeweilig herrschenden Regenbedingungen erzielt. Damit entfällt das bei geringen Regenfällen praktizierte häufige und meist auch lästige Ein- und Ausschalten des Scheibenwischers. Es sind in der Vergangenheit schon häufig Schaltungsvorschläge zu diesem Thema gegeben worden. Im Gegensatz zu anderen Schaltungen arbeitet der beschriebene Intervallschalter ohne Relais, d. h. also geräuschlos. Bild 3.3 zeigt den Aufbau der Schaltung. Als zeitbestimmendes Glied fungiert die *RC*-Kombination, die mit *R*5 und *C*1 gebildet wird. Je nach Einstellung von *R*5 lädt sich *C*1 mehr oder weniger schnell auf. Nach Erreichen der Ladespannung von *C*1 schalten T1 und damit auch T2 durch – der Thyristor

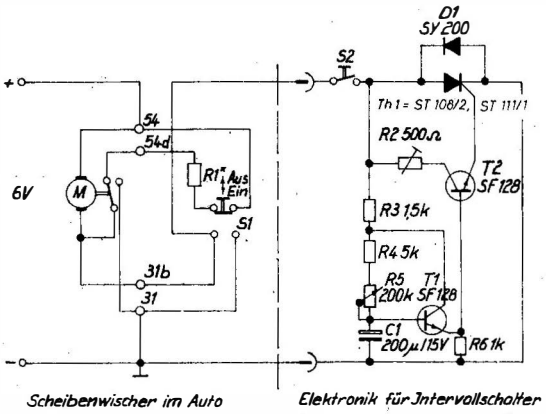


Bild 3.3 Intervallschalter für Scheibenwischer,
*) Erläuterung siehe Text

wird gezündet. Ist der Thyristor leitend, erhält der Scheibenwischermotor Strom und führt eine Wischbewegung aus. Überbrückt der Endlagenschalter den Thyristor, wird der Stromfluß unterbrochen und damit die Wischbewegung ebenfalls. Nun lädt sich, wie bereits oben beschrieben, $C1$ je nach Einstellung von $R5$ schneller oder langsamer auf. Mit $R2$ ist es möglich, je nach verwendetem Thyristortyp den Zündstrom entsprechend anzupassen. D1 wirkt als Freilaufdiode. Um die Wischerarme bei Erreichen der Endstellung abbremsen zu können, wird empfohlen, den Widerstand $R1$ einzubauen. Der genaue Wert richtet sich dabei nach dem gewünschten Grad der Abbremsung. Es kommen dafür niederohmige Widerstände (bis etwa 15 Ω/10 W) in Frage. Um ein einwandfreies Funktionieren der Schaltung zu gewährleisten, ist beim Einbau noch darauf zu achten, daß die vom Scheibenwischermotor kommenden Adern auch tatsächlich richtig am Scheibenwischerschalter S1 angeschlossen sind (ist nicht immer der Fall!). Das heißt also, die 54 am Motor mit der 54 am Schalter usw. Ansonsten sind, wie aus Bild 3.3 ersichtlich, zur Verbindung der Intervallschalterelektronik mit der bereits im Pkw vorhandenen Scheibenwischanlage nur 2 Verbindungsadern erforderlich.

3.4. Zündschaltung für Ottomotoren

Das Grundprinzip einer Thyristorzündanlage besteht darin, daß ein sogenannter Speicherkondensator über einen Gleichspannungswandler auf eine bestimmte Spannung aufgeladen wird. Danach ist es möglich, diesen Kondensator durch Zünden eines Thyristors über eine Zündspule zu entladen und somit einen Zündfunken zu erzeugen. Bild 3.4a zeigt die Prinzipschaltung einer Thyristorzündung für Kfz. Der Kondensator C ist hierbei der Speicherkondensator. Der Speicherkondensator lädt sich nicht allmählich, sondern impulsförmig auf. Das hat den Vorteil, daß stets eine konstante, von der Drehzahl nahezu unabhängige Energie zur Verfügung steht. Man kann die Aufladung des Speicherkondensators auf eine stets gleich große Spannung erreichen, indem man die Rückkopplung des Sperrwandlers bei einer ganz bestimmten Stromstärke unterbricht. Gedacht ist die Schaltung für Ottomotoren. Meistens liegen die Drehzahlen dieser Motoren

unter 6000 U/min. Es besteht zwischen der Funkenfrequenz der Zündung und der Drehzahl des Motors folgende Beziehung:

$$f = \frac{Z \cdot n}{120}$$

f in Hz, Z – Zahl der Zylinder, n – U · min^{-1}.
Nach der genannten Beziehung würde also für eine Drehzahl von 6000 U · min^{-1} eine Funkenfrequenz von 200 Hz in Frage kommen. So etwa ist auch die in Bild 3.4 dargestellte Schaltung aus-

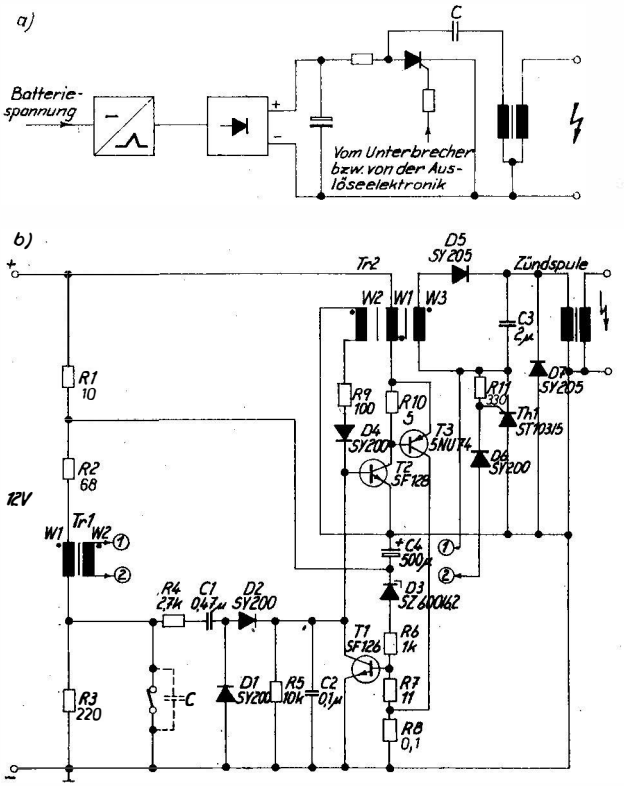


Bild 3.4 Thyristorzündschaltung;
a — Prinzipstromlaufplan, b — Anwendungsbeispiel

zulegen. Um eine sichere Zündung auch bei geringen Batteriespannungen zu gewährleisten, wurde die Funkenenergie gegenüber einer üblichen Zündanlage (etwa 50 mWs) ungefähr verdoppelt. Besondere Zündspulen sind nicht erforderlich, es können die bereits im Fahrzeug eingebauten Zündspulen verwendet werden. Ebenso kann der im Kfz in unmittelbarer Nähe des Unterbrechers befindliche Kondensator verbleiben. Er bewirkt lediglich einen Zündverzug, der in diesem Fall aber unkritisch ist. Die Schaltung bewirkt, daß bei Batteriespannung zwischen 3 V bis 15 V eine ausreichende Zündenergie zur Verfügung steht. Das macht sich u. a. besonders in den kälteren Jahreszeiten, in der es ja bekanntlich öfter „Anlaßschwierigkeiten" gibt, günstig bemerkbar.

Die Schaltung besteht in der Hauptsache aus dem Sperrwandler und dem Zündstromkreis. Bei der Betrachtung der Wirkungsweise der Schaltung wird angenommen, daß der Kontakt des Unterbrechers geschlossen sei und daß sich alle Transistoren im nichtleitenden Zustand befinden. Dabei fließt durch die Widerstände *R*1, *R*2 und durch die Primärwicklung *w*1 vom Transformator Tr1 ein Strom. Öffnet nun der Unterbrecherkontakt, der übrigens auch durch ein kontaktloses Steuerelement (Lichtschranke, Feldplatte o. ä.) realisiert werden kann, so entsteht ein positiver Impuls. Durch diesen Impuls wird u. a. der Transistor T2 über *R*4, *C*1 und D2 und damit auch der Transistor T3 aufgesteuert. Durch die Primärwicklung *w*1 des Wandlertransformators Tr2 fließt jetzt ein Strom über die Emitter-Kollektor-Strecke von T3 und über den Widerstand *R*8. Mit dem Anschalten der Betriebsspannung an die Wicklung *w*1 von Tr2 wird in der Wicklung *w*2 von Tr2 eine positive Spannung induziert, die einen Stromfluß zur Basis von T2 bewirkt – der Transistor T2 ist auch nach beendetem Steuerimpuls noch leitend. Der Spannungsabfall über *R*8 (den Widerstand stellt man sich aus einem kleinen Stückchen stärkeren Widerstandsdraht selbst her) steuert schließlich bei entsprechender Größe den Transistor T1 auf. Die Folge davon ist, daß der durch die Wicklung *w*2 erzeugte Rückkopplungsstrom nicht mehr zur Basis von T2 gelangt, sondern direkt nach Masse abgeleitet wird. Die Transistoren T2 und T3 sperren wieder, und die Wicklung *w*1 von Tr2 wird von der Betriebsspannung getrennt. Die Polarität an den Wicklungen wechselt. Der Kondensator *C*3 wird dadurch impulsförmig aufgeladen.

Parallel zu den eben beschriebenen Vorgängen gelangt von der Sekundärwicklung $w2$ des Transformators Tr1 beim Öffnen des Unterbrecherkontakts ein Zündimpuls zum Thyristor Th1. Wird Th1 gezündet, kann sich der Speicherkondensator $C3$ über den Thyristor und die Primärseite der Zündspule entladen, was schließlich zum gewünschten Zündfunken führt. Um beim Entladevorgang von $C3$ keine Schwingungen entstehen zu lassen, wurde die Diode D7 angeordnet. Die Widerstands-Kondensator-Kombinationen $R1/C4$ und $R4/C2$ sind Siebglieder, die ein ungewolltes Triggern verhindern sollen.

Zum Schluß noch einige Angaben zu den Transformatoren.

Transformator Tr1:

Schalenkern 22 × 13 (Zeichnungs-Nr. *5135.1—4311.22*) mit einem A_L-Wert 2200 ± 550 nH aus *Manifer 163*.

$w1$ = 250 Wdg., 0,22-mm-CuL,

$w2$ = 250 Wdg., 0,1-mm-CuL.

Beide Wicklungen sind gut voneinander zu isolieren!

Transformator Tr2:

Kern von Typ *LL 60/30* mit einem Luftspalt von 0,8 mm (nähere Angaben dazu siehe TGL 200—1737!).

$w1$ = 50 Wdg., 2,5-mm-CuL,

$w2$ = 50 Wdg., 0,35-mm-CuL,

$w3$ = 500 Wdg., 0,7-mm-CuL.

Es empfiehlt sich (aus Gründen der Abschirmung gegen kapazitiv übertragene Störspannungen) als unterste Wicklung $w2$ zu nehmen und darüber $w1$ zu wickeln. Bei den Wicklungen $w1$ und $w3$ ist zu beachten, daß diese jeweils gleichmäßig auf beide Schenkel des Kerns aufgeteilt und die Teilwicklungen phasenrichtig in Reihe geschaltet werden. Ein Aufteilen der Wicklung $w2$ ist nicht erforderlich. Auf richtige Polung der Wicklung $w3$ von Tr2 besonders achten!

3.5. Elektronisches Türschloß

Es ist immer reizvoll, wenn man die Tür eines Schrankes, eines Schreibtisches oder eines Zimmers, die nicht jeder ohne weiteres öffnen soll, nur durch die Wahl einer bestimmten Ziffernkombination öffnen kann. Häufig schon wurden sogenannte elektronische Türschlösser beschrieben. Diese Schaltungen waren aber u. a.

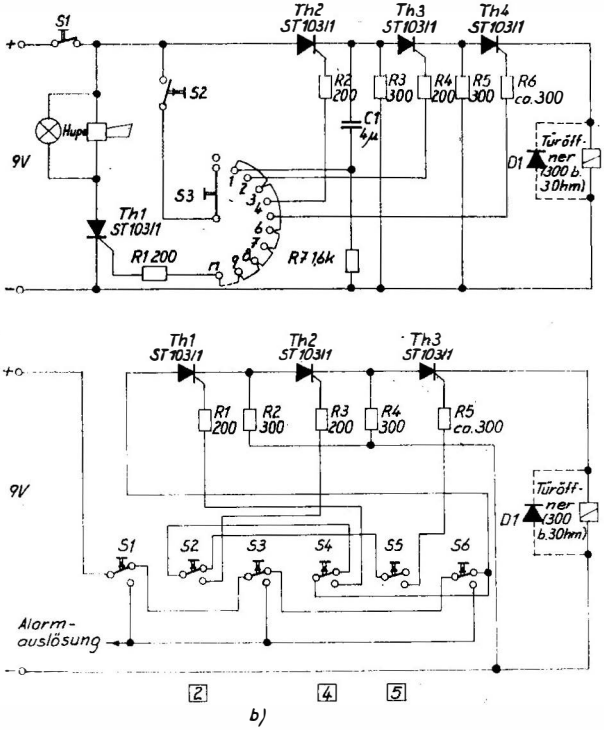


Bild 3.5 Elektronisches Türschloß;
a — mit Stufenschalter, b — mit Drucktaster zur Wahl der Ziffernfolge

stets mit Relais versehen. Schaltungen dieser Art haben meistens den Nachteil, daß ein Unbefugter am Klicken der Relais unter Umständen leichter die für ihn unbekannte Kombination der Ziffern herausbekommt. Durch oftmals umfangreiche Maßnahmen zur Schallisolierung läßt sich der eben genannte Nachteil weitgehend beseitigen. Die beschriebene Schaltung arbeitet, bis auf den Türöffner, geräuschlos. Sie wurde mit maximal 4 Thyristoren aufgebaut, was sich als völlig ausreichend erwies. Es können jedoch noch mehr Thyristorstufen vorgesehen werden, je nachdem,

wie viele Ziffern man für eine Kombination verwenden möchte. In Bild 3.5 sind 2 Varianten eines elektronischen Türschlosses dargestellt. Das Prinzip der Schaltung nach Bild 3.5a ist folgendes. Mit dem Stufenschalter S3 werden nacheinander die Ziffern in der programmierten Reihenfolge eingestellt. Jeweils nach der Einstellung einer Ziffer wird die Taste S2 gedrückt. Wurde die Ziffer laut Programmierung richtig gewählt, erhält der jeweilige Thyristor über den zugehörigen Schutzwiderstand ($R2$, $R4$ oder $R6$) in der Steuerleitung die erforderliche Steuerspannung. Der Thyristor wird gezündet, und über den Arbeitswiderstand ($R3$, $R5$ bzw. Türöffner) fließt ein Strom. Damit der gezündete Thyristor auch nach dem Loslassen der Taste S2 leitend bleibt, muß der Arbeitswiderstand so groß gewählt werden, daß im Laststromkreis ein Strom fließt, der größer ist als der für den jeweiligen Thyristortyp angegebene Haltestrom. Gleichzeitig mit dem leitend gewordenen Thyristor ist die Zündbereitschaft für den nächstfolgenden Thyristor hergestellt. Wenn man nun aus Unkenntnis der richtigen Ziffernfolge eine falsche Ziffer wählt, wird durch entsprechende Schalterstellung von S3 die Spannung des Löschkondensators $C1$ in Sperrichtung an den Thyristor gelegt. Der Stromfluß durch Th2 sinkt unter den Wert des Haltestroms, und die bis dahin richtig eingestellte Ziffernfolge wird somit gelöscht. Mit der Einstellung muß von vorn begonnen werden. Weiterhin kann man bei Falschwahl einer Ziffer über den Thyristor Th1 ein Warnsignal (akustisch und/oder optisch) auslösen. Bei Hupen (o. ä.) mit Selbstunterbrecher ist die Lampe (oder ein entsprechender Widerstand), wie Bild 3.5a zeigt, auf jeden Fall zur Gewährleistung des erforderlichen Haltestroms von Th1 vorzusehen. Es genügt, die Löscheinrichtung hinter Th2 anzuordnen, da vorher falsch gewählte Ziffern keine Schalthandlungen hervorrufen. $C1$ wird, nachdem Th2 gezündet wurde, über $R7$ auf den Wert der Betriebsspannung aufgeladen. Die in Bild 3.5a dargestellte Schaltung ist für die Ziffernfolge 4-2-5 ausgelegt. Am Schalter S3 kann jederzeit die Programmierung geändert werden, was man beispielsweise von Zeit zu Zeit aus Sicherheitsgründen durchführen sollte. Auch kann man die Schaltung so erweitern, daß dieser oder jener Thyristor zeitverzögert gezündet wird. Das heißt, es muß erst eine bestimmte Zeit vergehen, bis die nächstfolgende Ziffer eingestellt werden darf. Zur Erzielung der erforderlichen Zeitverzögerung kann z. B. die in Bild 3.2b dargestellte Schaltung

benutzt werden (der in dieser Schaltung enthaltene Schalter S1 entfällt dabei für den hier genannten Zweck).
Als Türöffner wurde im vorliegenden Fall ein umgebautes Relais benutzt. Es gibt industriell gefertigte Türöffner (nach TGL 9803) für eine Nennspannung von 12 bzw. 24 V und eine maximale Stromaufnahme von 1 A. Diese Türöffner arbeiten bei Betriebsspannungen von 4... 12 V bzw. 12...24 V. Weiterhin zu beachten ist, daß je Thyristorstufe ein bestimmter Spannungsabfall auftritt. Bei Verwendung vieler Thyristorstufen kann dadurch die für den Türöffner erforderliche Spannung eventuell zu gering werden. An die Stelle des Türöffners kann auch eine elektromechanische Verriegelung eines üblichen Schlosses treten oder ein Motor, der die entsprechende Tür dann automatisch öffnet. Verwendet man selbstgefertigte Türöffner für höhere Spannungen, so ist auf die zulässige Sperrspannung der Thyristoren zu achten. Liegt über *R6* bei nicht eingeschalteten Thyristoren Th2 und Th3 eine Spannung an der Steuerelektrode von Th4, so wird unter Umständen nur während des Vorhandenseins der Steuerspannung der Türöffner betätigt. Um das zu verhindern, ist *R6* so groß zu dimensionieren, daß bei nicht gezündeten Thyristoren Th1 und Th3 und einer über *R6* anliegenden Steuerspannung der Türöffner nicht, aber bei gezündeten Thyristoren Th2 und Th3 und anliegender Steuerspannung der Türöffner sicher betätigt wird. Bei höheren Betriebsspannungen für den Türöffner sollte man, wie in Bild 3.5 angedeutet, parallel zum Türöffner eine Freilaufdiode D1 schalten. Sie schützt die Thyristoren beim Abschalten vor zu hohen Spannungsspitzen. D1 muß so bemessen werden, daß über diese Diode ein Strom in der Höhe des Laststroms fließen kann. Durch Schließen des Schalters S1 wird die Betriebsbereitschaft der gesamten Anlage hergestellt. Beim Einbau einer Warnsignalisation dient S1 gleichzeitig zum Quittieren der Warnmeldung, d. h. also in diesem Fall zum Abschalten der Hupe.
Bild 3.5b zeigt eine weitere Möglichkeit zum Aufbau eines elektronischen Türschlosses. Nur werden hier die Ziffern mit Einzeltastern (S1 ... S6) angewählt. Bei Falschwahl einer Ziffer erfolgt eine Unterbrechung des Laststromkreises und damit gleichzeitig die Löschung der bis dahin richtig eingestellten Ziffernfolge. Auch bei dieser Schaltung ist es möglich, ein Warnsignal auszulösen. Die für die programmierte Ziffernfolge nicht benutzten

Taster sind entsprechend Bild 3.5b zu beschalten. Ansonsten gilt hier das gleiche wie zu Bild 3.5a Gesagte, so daß sich eine weitere Erläuterung zu Bild 3.5b erübrigt. Die beschriebene Schaltung ist selbstverständlich noch erweiterungsfähig. So könnte beispielsweise das Problem der mehrmaligen Anwahl ein und derselben Ziffer Berücksichtigung finden. Auch an eine zweite, gleichartige Stromquelle sollte man denken, die bei Ausfall der ersten automatisch oder von Hand zugeschaltet wird.

3.6. Ringzähler mit Thyristoren

Ringzählerschaltungen werden u. a. zur Ansteuerung von Ziffernanzeigeröhren, zur Steuerung von Laufschriften für dekorative Zwecke angewendet. Wird bei der Ansteuerung von Ziffernanzeigeröhren ein Thyristor-Ringzähler benutzt, so ergeben sich Vorteile hinsichtlich der Leistungsaufnahme und einer geringeren Anzahl von benötigten Bauteilen. Bei einem solchen Ringzähler übernehmen die Thyristoren 2 Funktionen, die Ansteuerung der Ziffernanzeigeröhren und die des Zählens. Mit der beschriebenen Schaltung soll lediglich kurz die prinzipielle Wirkungsweise eines Ringzählers mit Thyristoren erläutert werden. Der interessierte Leser findet unter [7] ein praktisches Beispiel für die Anwendung eines Ringzählers mit Thyristoren. Der eigentliche Ringzähler der in Bild 3.6 gezeigten Schaltung besteht aus den Thyristoren

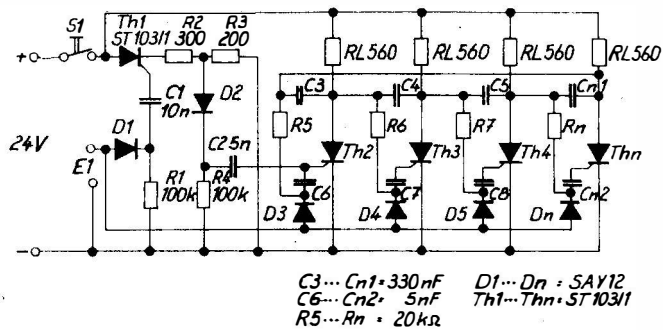


Bild 3.6 Ringzählerschaltung

Th2 bis Thn. Die Anzahl der Thyristoren richtet sich dabei selbstverständlich nach der Anzahl der in Frage kommenden Verbraucher. In der Anodenleitung der Thyristoren befinden sich die Lastwiderstände. Untereinander sind die Anoden der Thyristoren über Kondensatoren verbunden. Hierbei erfüllen die Kondensatoren die Funktion eines Löschkondensators. Beim Einschalten der Betriebsspannung sind zunächst alle Thyristoren stromlos. Th1 wird durch einen über den Eingang E1 kommenden ersten Impuls gezündet. Der nun durch den gezündeten Thyristor Th1 fließende Strom erzeugt am Spannungsteiler $R2/R3$ eine so große Spannung (etwa 10 V), die ausreicht, um den ersten Thyristor des Ringzählers (Th2) zu zünden. Weitere Impulse schalten dann der Reihe nach die anderen Thyristoren durch. Wobei jeweils immer nur ein Thyristor leitet. Zur Erläuterung der Funktionsweise sei angenommen, daß Th2 gerade leitet. Für einen neuen Impuls leitet in diesem Fall nur D4, da über $R6$ keine Sperrspannung mehr für D4 vorhanden ist. Alle anderen Dioden sind vom Potential der Thyristoranoden über die Widerstände $R5$, $R7$ und Rn in Sperrichtung vorgespannt. Der über D4 kommende bereits genannte Impuls zündet damit Th3. Zündet der folgende Thyristor durch, so wird mit dem Löschkondensator der vorhergehende Thyristor wieder gelöscht. Th1 bleibt dabei so lange leitend, wie die Betriebsspannung anliegt. Sollten sich auf Grund entsprechend anderer Verbraucher (z. B. Glühlampen) die Werte für die Lastwiderstände ändern, so sind die Löschkondensatoren in der Weise neu zu dimensionieren, daß auf jeden Fall die Bedingung $R \cdot C > 180\ \mu s$ eingehalten wird. Für die Impulserzeugung wird ein Generator mit einem Innenwiderstand von 100 Ω und einer Ausgangsspannung von 10 V empfohlen. Die Impulse selbst sollen sehr steile Flanken (Anstiegszeit $< 2\ \mu s$) und eine Frequenz bis maximal 1 kHz haben.

4. Anwendungsmöglichkeiten für Wechselstrom

4.1. Wechselstromschalter

Mit der in Bild 4.1 dargestellten Schaltung lassen sich große Lastströme mit kleinen Schaltern, wie z. B. Mikrostößeltaster, schalten. Bei diesem Wechselstromschalter sollen beide Halbwellen der Netzwechselspannung ausgenutzt werden. Deshalb werden hierbei 2 Thyristoren verwendet. Bei geschlossenem Kontakt von S1 wird jeweils einer der Thyristoren über D1 und R1 bzw. über D2 und *R*1 direkt angesteuert. Gegen Ende der Halbwelle löscht der gerade eingeschaltete Thyristor in dem Moment, bei dem der Haltestrom unterschritten wird. Das heißt, beide Halbwellen der Netzwechselspannung stehen der Last so lange zur Verfügung, wie auch der Schalter S1 geschlossen ist. Da der Thyristor immer erst nach dem Öffnen des Schalters ausschaltet, können die vorher erwähnten Schalter geringer Belastbarkeit sehr zweckmäßig zur Steuerung großer Lastströme eingesetzt werden. Die Auswahl der Thyristoren richtet sich in jedem Fall nach dem zu schaltenden Laststrom und auch nach der zur Verfügung stehenden Betriebsspannung. Auch die Auswahl der Sicherung richtet sich nach den Verhältnissen im Laststromkreis. Verwendet man andere als die in Bild 4.1 dargestellten Thyristortypen, so ändern sich die Werte von D1, D2 und *R*1 nicht. Für die in Bild 4.1 abgebildete Schaltung können Verbraucher mit einer Leistung bis zu etwa 3000 W angeschlossen werden. Zu beachten ist hierbei, daß sich der Laststrom auf beide Thyristoren aufteilt, d. h., jeder Thyristor braucht nur für den halben Laststrom ausgelegt zu sein.

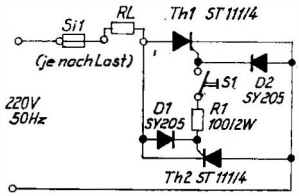


Bild 4.1 Wechselstromschalter

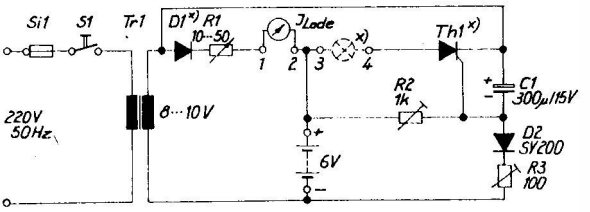


Bild 4.2 Notstromschalter, *) Erläuterungen siehe Text

4.2. Notstromschalter

Die in Bild 4.2 gezeigte Schaltung stellt einen vollelektronischen Schalter dar, der bei Ausfall der Netzspannung den Verbraucher unverzüglich an eine Notstromquelle schaltet. Bei vorhandener Netzspannung wird $C1$ über D2 und $R3$ aufgeladen. Auf Grund des dabei entstehenden Potentials am Kondensator bleibt der Thyristor Th1 gesperrt und somit der an die Klemmen 3 und 4 angeschlossene Verbraucher stromlos. Gleichzeitig wird bei anliegender Netzspannung der Akkumulator über D1 und $R1$ aufgeladen. Mit dem Widerstand $R1$ ist es möglich, den Ladestrom richtig einzustellen. Verzichtet man auf eine Ladestromkontrolle, so sind die Klemmen 1 und 2 zu überbrücken. Die Dimensionierung der Diode D1 richtet sich ganz nach dem zur Anwendung kommenden Akkumulator. Bei großen Lastströmen ist eine Diode vom Typ *SY 160* zu empfehlen. Bei geringeren Strömen genügt oft schon eine Diode *SY 200*. Fällt die Netzspannung aus, so entlädt sich $C1$, und die Steuerelektrode des Thyristors erhält dadurch positives Potential. Der Thyristor wird gezündet, und damit erhält der Verbraucher gleichzeitig seine Spannung von der Notstromquelle. Der Thyristor bleibt bis zur Wiederkehr der Netzspannung leitend. Bei Wiederkehr der Netzspannung wird in dem Moment, bei dem die positive Halbwelle der Wechselspannung an der Katode des Thyristors liegt, der Thyristor gelöscht. Soll der Notstromschalter lediglich dafür benutzt werden, daß bei Ausfall der Netzspannung eine ausreichende Notbeleuchtung zur Verfügung steht (Fluchtweg), so schließt man an die Klemmen 3 und 4 eine oder mehrere Glühlampen an. Bei dieser Variante ist auf eine richtige Dimensionierung der Sekundärwicklung des Transformators zu achten, da der gesamte Lampenstrom auch über

diese Wicklung fließt! Weiterhin richtet sich nach dem zu erwartenden Laststrom die Auswahl des Thyristors Th1. An Stelle der Glühlampen kann auch ein 6-V-Relais eingesetzt werden. Diesem Relais ist dann eine Freilaufdiode (Polung entgegen der Hauptstromrichtung) parallelzuschalten, um auf diese Weise den Thyristor vor schädlichen induktiven Überspannungen zu schützen. Die Freilaufdiode ist dabei so auszuwählen, daß sie den gesamten, durch das Relais hervorgerufenen Laststrom übernehmen kann. Mit diesem Relais kann man nun entweder eine zweite 220-V-Einspeisung zuschalten oder andere Spannungsquellen, die zur Aufrechterhaltung eines Notbetriebs erforderlich sind. Auch ist durch den Einsatz eines Relais die Möglichkeit vorhanden, ein optisches und/oder akustisches Signal auszulösen, das eventuell in einem anderen Raum oder Gebäude angezeigt wird.

4.3. Universelle Blinkschaltung

Die nachstehend beschriebene Schaltung zeigt einen universell einsetzbaren Blinkgeber. Mit diesem Geber können z. B. Glühlampen sowohl kontaktlos als auch bei Verwendung eines Relais über Kontakte angesteuert werden (Anschluß an die Klemmen 1 und 2). Während bei der kontaktlosen Variante die Leistung und damit auch die Anzahl der Lampen durch den zur Verfügung stehenden Thyristor begrenzt wird, bietet eine Variante mit Relais den Vorteil, daß größere Lastströme geschaltet werden können. Das ist besonders dann günstig, wenn man nur Thyristoren für geringe Nennströme besitzt, aber größere Lastströme schalten möchte. Außerdem können bei Relais mit Wechselkontakten vielseitige Blinkeffekte erzielt werden (z. B. 2 Lampen immer wechselseitig ein und aus). Neben Lampen lassen sich beispielsweise zur Lösung von Aufgaben in der Steuerungs- und Regelungstechnik auch Motoren, Magnetventile oder andere Verbraucher periodisch ein- und ausschalten. Bei Relais ist selbstverständlich auf die höchstzulässige Kontaktbelastung zu achten. Für die beschriebene Schaltung wurde ein RELOG-Relais *2 RH 01* für 220-V-Gleichspannung benutzt. Diode D2 wirkt als Freilaufdiode. Sie entfällt, wenn an die Klemmen 1 und 2 nur Glühlampen angeschlossen werden. Über die Diode D1 und die Widerstände $R1$ und $R2$ wird der Kondensator $C2$, je nach Stellung von $R1$,

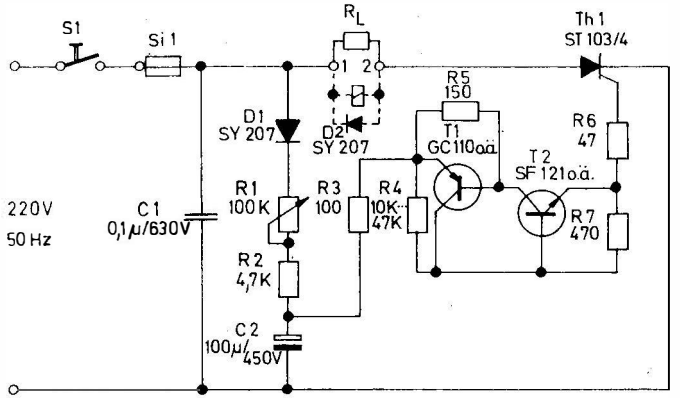


Bild 4.3 Universell einsetzbarer Blinkgeber

mehr oder weniger schnell aufgeladen. *R2* ist ein Schutzwiderstand. Ist *C2* nicht oder nur wenig aufgeladen, sind beide Transistoren gesperrt. Steigt die Spannung soweit, daß an *R7* die Schleusenspannung der „Basis-Emitter-Diode" von T2 erreicht ist, beginnt durch T2 ein Strom zu fließen. T1 erhält damit über T2 einen Basisstrom und wird leitend. *R4* wird jetzt durch T1 überbrückt. T2 erhält auf diese Weise einen hohen Basisstrom und steuert voll durch. Gleichzeitig erhält dadurch der Thyristor Th1 einen positiven Impuls — Th1 wird ebenfalls gezündet. Er führt kurzzeitig einen Strom bis zu dem Zeitpunkt, bei dem die Netzhalbwelle sich der Nullinie nähert und damit der Haltestrom unter den zulässigen Wert absinkt. In dem Moment, in dem Th1 leitend wird, entlädt sich auch der Kondensator *C2*. Für *C2* ist ein Kondensator mit möglichst geringen Reststrom auszuwählen. Wird das nicht beachtet, so kann es vorkommen, daß die gesamte Schaltung nicht ordnungsgemäß arbeitet.

4.4. Blinkschaltung mit Multivibratoransteuerung

Für Demonstrationszwecke, Werbung, Reklame oder aber als Warnlichtanlage für das eigene Grundstück (z. B. zum Absichern einer Baustelle) wird oftmals eine Blinkschaltung benötigt. Die

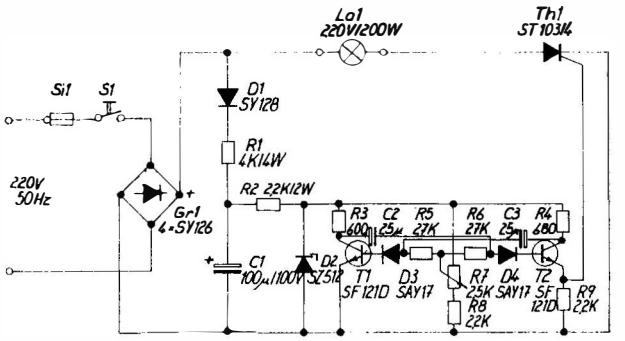


Bild 4.4 Kontaktlose Blinkschaltung

in Bild 4.4 dargestellte Schaltung arbeitet kontaktlos und ist für direkten Netzanschluß ausgelegt. Die Lampe La1 (auch mehrere Lampen sind möglich) wird durch den Thyristor Th1 periodisch ein- und ausgeschaltet. Hell- und Dunkelzeit sind dabei theoretisch gleich. Beim Ausschaltvorgang leuchtet die Glühlampe allerdings noch etwas nach, da ja bekanntlich Glühlampen nicht schlagartig verlöschen. Gedacht ist die Schaltung für Glühlampen bis zu einer Leistung von 200 W. Durch eine andere Dimensionierung von Gr1 und Th1 sind auch weitaus größere Leistungen möglich. Angesteuert wird der Thyristor durch einen astabilen Multivibrator, der weiter keine Besonderheiten aufweist. Auf weitere Erläuterungen dazu soll deshalb verzichtet werden. Der Thyristor zündet immer dann durch, wenn der Transistor T2 leitend ist. Während dieser Zeit erhält Th1 einen Steuerstrom. Bei jeder Netzhalbwelle wird Th1 gezündet – die Lampe brennt mit voller Helligkeit. Über den Widerstand *R*9 werden die für den Thyristor erforderlichen Zündimpulse abgegriffen. Schaltet der Multivibrator um, d. h., wird der Transistor T1 leitend, erhält der Thyristor keinen Steuerstrom mehr. Das hat wiederum zur Folge, daß Th1 am Ende der Halbwelle, in der umgeschaltet wurde, löscht (Haltestrom wird unterschritten). Erst wenn T2 wieder leitend ist, wird auch Th1, wie beschrieben, gezündet.
Mit dem Widerstand *R*7 läßt sich die Blinkfrequenz in bestimmten Grenzen ändern. Weiterhin ist es möglich, durch Veränderung der Werte von *C*2 und/oder *C*3 des Multivibrators eine grundsätzlich andere Blinkfrequenz zu erzielen. Die für den

Multivibrator benötigte Gleichspannung wird mit D1, $R1$ und $C1$ hergestellt. Die Z-Diode D2 bewirkt, daß der Multivibrator mit einer nahezu konstanten Spannung von 12 V versorgt wird. Das ist wichtig für die Frequenzkonstanz der Schaltung, besonders bei Schwankungen der Netzspannung.

4.5. Lichtempfindlicher Schalter

Die beschriebene Schaltung (Bild 4.5) zeigt einen lichtempfindlichen Schalter. Wandelt man die Schaltung etwas um, so läßt sie sich vielfältig einsetzen. Man kann sie u. a. als Dämmerungsschaltung zum Einschalten der Hausbeleuchtung oder zum Einschalten der Warnbeleuchtung bei Einbruch der Dunkelheit benutzen. Bei Verwendung einer künstlichen Lichtquelle läßt sich mit dieser Schaltung eine Lichtschranke aufbauen, die für Sicherungs- und Warnaufgaben oder aber für Zähleinrichtungen und ähnliche Verwendungszwecke eingesetzt werden kann. Mit einer solchen Lichtschranke ist es z. B. möglich, je nach Dimensionierung von Th1, eine größere Last ohne den sonst üblichen Schaltverstärker zu schalten.

Der Schaltungsaufbau ist einfach. Bei Lichteinfall auf den Fotowiderstand $R5$ wird der Transistor T1 leitend. Es fließt dadurch zur Basis von T2 ein Strom, der den Transistor T2 aufsteuert.

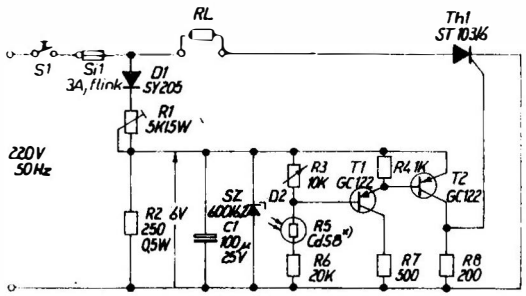


Bild 4.5 Lichtempfindlicher Schalter,*) Austauschtypen für die inzwischen eingestellte DDR-Produktion von CdS-Fotowiderständen = *FO-K3* (UNITRA, VR Polen) oder *WK* 650 37 bzw. *WK* 650 38 (TESLA, ČSSR), weitere Typen siehe auch [28]

Die über den Widerstand $R8$ abgegriffene Zündspannung bewirkt schließlich, daß Th1 leitend und damit der Lastwiderstand (Glühlampen, Motor u. a.) eingeschaltet wird. Mit $R1$ ist eine Spannung von 6 V einzustellen. Zu beachten ist, daß bei dieser Schaltung nur die positive Halbwelle wirksam wird. Damit wird bei ausbleibendem Lichteinfall der Stromfluß durch Th1 und somit auch durch den Lastwiderstand R_L unterbrochen. Die Ansprechempfindlichkeit läßt sich mit dem veränderlichen Widerstand $R3$ einregeln. Man kann somit die Schaltung an die jeweils vorhandenen Lichtverhältnisse anpassen.
Will man die Schaltung als Dämmerungsschalter benutzen, so ist an Stelle von $R3$ der Fotowiderstand $R5$ und ein Widerstand von 5 kΩ einzusetzen. An die bisherige Stelle von $R5$ und $R6$ kommt ein regelbarer Widerstand von 500 kΩ zur Regulierung der Ansprechempfindlichkeit. In diesem Fall hat die Schaltung eine ähnliche Wirkung wie der unter 2.2. beschriebene Begrenzerwiderstand $R1$. Das bedeutet, daß bei einer Glühlampe als Lastwiderstand diese mit zunehmender Dunkelheit immer heller brennt. Bei einem induktiven Verbraucher ist dieser in üblicher Weise mit einer Freilaufdiode zu beschalten. Die Spannung von 6 V kann auch mit einem Klingeltransformator und einer entsprechenden Gleichrichterschaltung erzeugt werden. D1, $R1$ und $R2$ würden dann entfallen.

4.6. Kontaktloser Zeitschalter

Es soll eine Schaltung beschrieben werden, die einen Verbraucher nach einer bestimmten, vorgewählten Zeit automatisch abschaltet. Diese Zeit läßt sich stufenweise bzw. bei Verwendung eines Potentiometers kontinuierlich einstellen. Da dieser Zeitschalter ohne Relais, also völlig geräuschlos, arbeitet, eignet er sich besonders dazu, Lese- oder Nachttischlampen abzuschalten. Schläft man leicht beim Lesen ein, ist eine solche Abschaltung äußerst bequem. Man vermeidet damit, daß z. B. Lese- oder Nachttischlampen ungewollt die ganze Nacht brennen. Sollte der Lesende nach Ablauf der eingestellten Zeit doch noch weiterlesen wollen, so braucht er nur auf den Taster S2 zu drücken. Eine kleine Kontrollampe La2 erleichtert im Dunkeln das Auffinden der Taste S2. Eine elegante Lösung ist die Unterbringung

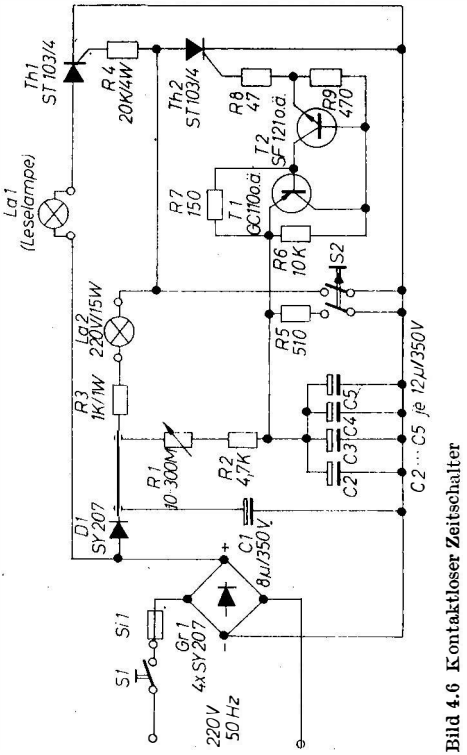


Bild 4.6 Kontaktloser Zeitschalter

dieser Kontrolleuchte in einem Leuchttaster. Für den letztgenannten Fall läßt sich selbstverständlich die in Bild 4.6 dargestellte Lampe La2 nicht in einem Leuchttaster unterbringen. Die Schaltung ist dann so zu verändern, daß für La2 eine Kleinlampe (6...24 V) und für $R3$ ein entsprechender Vorwiderstand, dessen Wert sich nach dem Lampenstrom von La2 richtet, verwendet wird. Benutzt man beispielsweise eine Signal-Kleinlampe 24 V/0,025 A nach TGL 10449, Bl. 2, wie sie für Signalisationszwecke üblich ist, so müßte $R3$ einen Wert von etwa 13 kΩ/10 W haben. Den Vorwiderstand berechnet man dabei für eine Verlustleistung P_v nach

$$P_v = I^2 \cdot R .$$

Der Zeitschalter arbeitet mit 2 Thyristoren, wobei der Thyristor Th1 der eigentliche Schalter für den Verbraucher ist. Die erforderliche Gleichspannung wird mit der *Graetz*-Schaltung Gr1 gewonnen. Die Diode D1 und der Ladekondensator *C*1 bewirken, daß der aus *R*1, *R*2 und *C*2 ... *C*5 bestehende Zeitkreis eine relativ reine Gleichspannung von etwa 300 V erhält. Je nach Größe der Widerstände im Zeitkreis laden sich die Kondensatoren mehr oder weniger schnell auf. Die Funktionsweise der Zündschaltung mit T1 und T2 wurde bereits in Abschnitt 4.3. erläutert. Bei gezündetem Thyristor Th2 leuchtet die Kontrollampe La2 hell auf. Im gleichen Moment erhält Th1 keine Zündspannung mehr. Auf Grund des pulsierenden Gleichstroms, der Th1 speist, wird auch der Thyristor gelöscht und damit die Leselampe La1. Ist man noch nicht eingeschlafen und möchte gern weiterlesen, braucht man nur auf die Taste S2 zu drücken — die Leselampe brennt wieder. Mit dem Taster S2 wird mit der einen Schaltebene der Zeitkreis entladen und mit der anderen Schaltebene Th2 überbrückt und damit gelöscht. Läßt man die Taste los, d. h., sind die Kontakte des Tasters S2 wieder geöffnet, beginnt der Aufladevorgang der Kondensatoren *C*2 ... *C*5 von vorn, bis Th2 gezündet wird und die Leselampe La1 abermals erlischt. An Stelle von La2 und *R*3 kann selbstverständlich auch ein passender Widerstand (4,7 kΩ/2 W) eingesetzt werden. Dabei ist besonders auf eine gute und zweckmäßige Wärmeabfuhr zu achten!

Die in Bild 4.6 dargestellten Kondensatoren *C*2 ... *C*5 sollten nicht durch einen Kondensator ersetzt werden. Der Grund ist in den besonders bei Elektrolytkondensatoren unvermeidlichen Restströmen zu suchen. Kondensatoren mit großen Restströmen stellen das einwandfreie Funktionieren der Schaltung, besonders bei längeren Zeitbereichen, in Frage. Empfohlen werden können Kondensatoren für erhöhte Anforderungen vom Typ *IB* nach TGL 14122/02. Bei Kondensatoren mit sehr geringen Restströmen kann man mit dieser Schaltung Zeiten bis zu einer halben Stunde erreichen. Auch läßt sich der Widerstand (oder die Widerstandskombination) von *R*1 nicht „unendlich" groß auslegen, da der Isolationswiderstand der gesamten Schaltung eine Grenze setzt. Eine Zeitverlängerung läßt sich durch Vergrößerung von *C*2 ... *C*5 erreichen. Die Widerstände im Steuerkreis des Thyristors Th1 bewirken einen bestimmten Zündverzug. Dadurch, daß von La2

zunächst der Kaltwiderstand (etwa 350 Ω) und etwas später dann der Warmwiderstand (etwa 3,6 kΩ) wirksam wird, brennt die Lampe La1 im ersten Moment nach dem Einschalten etwas heller. Hat La2 ihren Warmwiderstand erreicht (erhöhter Widerstand im Steuerkreis, s. auch Bild 2.3), so ist die Zündverzugzeit größer geworden, und die Leselampe leuchtet etwas dunkler. Auf Grund der Dimensionierung von Gr1 können bei der in Bild 4.6 dargestellten Schaltung Glühlampen bis zu 300 W angeschlossen werden.

4.7. Zeitschalter mit Relais

Mit diesem Zeitschalter werden größere Verbraucher nach Ablauf einer vorher eingestellten Zeit automatisch ab- bzw. zugeschaltet. So kann beispielsweise die Schaltung nach Bild 4.7 als Treppenlichtautomat (oder ähnlichen Verwendungszweck), zum Abschalten von Lüftern bzw. Ventilatoren, anderen elektromotorischen Verbrauchern, Heizgeräten oder aber zum zeitverzögerten Zuschalten elektrischer Verbraucher angewendet werden (Sicherheitsschaltung, Unterdrückung von Störwerten beim Anlauf einer Anlage, Stufenschaltung von Glühlampen mit Unterdrückung einer Stufe für eine gewisse Zeit u. ä.). Ein kleiner Nachteil dieser Schaltung besteht darin, daß die Netzspannung selbst nicht abgeschaltet wird. Die Höhe des zu schaltenden Laststroms richtet sich auch hier nach der zulässigen Belastbarkeit der Kontakte des jeweils verwendeten Relais.

Der Verbraucher ist direkt über einen Relaiskontakt mit dem Netz verbunden. Die für die Schaltung erforderliche Gleichspannung wird mit den Dioden D1 und D2 gewonnen und mit dem Kondensator $C1$ bzw. $C2$ geglättet. Der zeitbestimmende Kreis der Schaltung wird aus den Widerständen $R2$ ... Rn ($+R5$) sowie aus den Kondensatoren $C3$ ... $C6$ gebildet. Die Größe des Kondensatorwertes für $C1$ richtet sich nach dem Energiebedarf des Relais. Die in Bild 4.7 dargestellten 4 Kondensatoren sollen nach Möglichkeit nicht durch einen Kondensator ersetzt werden. Auch hier gilt für den Zeitkreis [$C3$ bis $C6$ und $R2$ ... Rn ($+$ $R5$)] das dazu unter 4.6. Gesagte. Die Verzögerungszeit wird mit $R2$ ... Rn eingestellt. Je nachdem, ob man nur eine Verzögerungszeit oder mehrere variable Zeiten benötigt, genügen

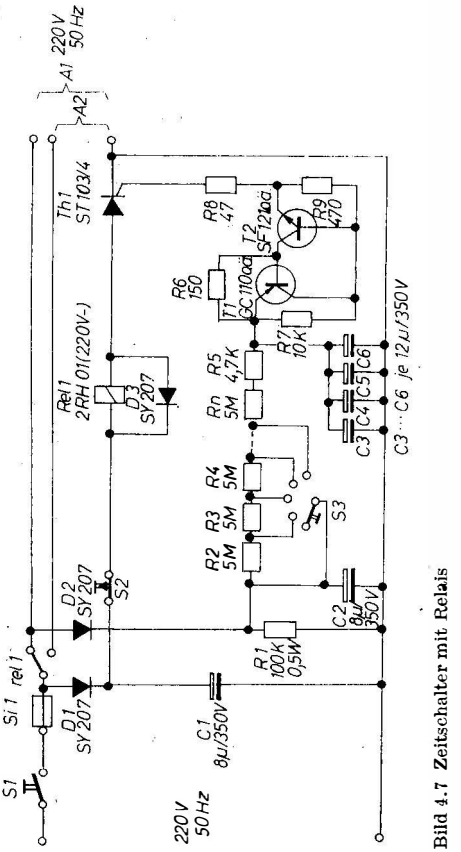


Bild 4.7 Zeitschalter mit Relais

für $R2 \ldots Rn$ ein bzw. mehrere Festwiderstände, die über einen mehrstufigen Schalter S3 miteinander kombiniert werden. Durch Veränderung von $C3 \ldots C6$ kann ebenfalls eine Verzögerungszeit in bestimmten Grenzen variiert werden. Der Thyristor Th1 wird mit der bereits in Abschnitt 4.3. beschriebenen Zündschaltung gezündet. Gleichzeitig mit dem Zünden des Thyristors Th1 wird das Relais betätigt und der Verbraucher vom Netz getrennt bzw. zugeschaltet. Soll der Verbraucher erneut ein- bzw. abgeschaltet werden, so braucht man nur auf die Taste S2 zu drücken. Der

Stromfluß durch den Thyristor wird unterbrochen und damit der Thyristor in den nichtleitenden Zustand versetzt. Das Relais fällt ab, und der Aufladevorgang von *C*3 ... *C*6 beginnt von vorn. Bei Benutzung von Ausgang A1 wird der angeschlossene Verbraucher nach Ablauf der vorgewählten Zeit abgeschaltet und bei Verwendung von Ausgang A2 eingeschaltet. Die Auswahl von D1 richtet sich nach dem verwendeten Relaistyp.

4.8. Überstromschalter

Dieser mit einem Relais arbeitende Überstromschalter läßt sich weitgehend universell einsetzen. Er hat die Aufgabe, Verbraucher beim Auftreten von Überströmen automatisch vom Netz zu trennen. Handelt es sich um einen größeren Verbraucher, bei dem von der Belastung her z. B. ein Relais *2 RH 01* nicht mehr ausreicht, kann selbstverständlich ein kleineres Schütz (z. B. Luftschütz vom Typ *GD 6/4*, 220-V-Gleichspannung) verwendet werden. Dabei ist auf eine andere Dimensionierung der Dioden D1 und D2 zu achten. Die Schaltung nach Bild 4.8 eignet sich neben der Anwendung für Handbohrmaschinen, Kreissägen auch für alle anderen elektrischen Verbraucher (Heizungen, Transformatoren, Lampen, Haushaltsgeräte usw.) als Überstromschalter. So kann man mit dieser Schaltung auch verhindern, daß im Eifer des Gefechts zu viele Fotolampen größerer Leistung angeschlossen werden und dadurch die Sicherungen durchbrennen, wenn man beim Fotografieren bzw. Filmen in Wohnräumen öfters Foto-

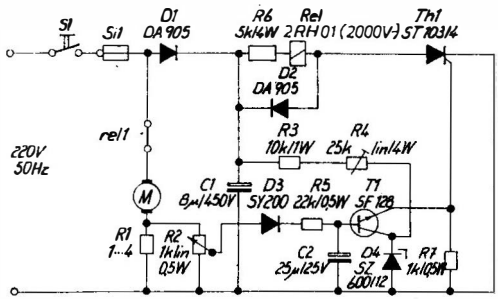


Bild 4.8 Überstromschalter mit Relais; bei Rel richtig 220 V

lampen zu- bzw. abschalten muß. Die Fotoarbeiten werden also durch diese Schaltung vor lästigen Störungen bewahrt.
Das Prinzip der Schaltung besteht darin, daß der durch den Widerstand *R1* fließende Strom des jeweiligen Verbrauchers einen Spannungsabfall proportional zur Belastung erzeugt. Dieser Spannungsabfall wird dazu benutzt, bei einer bestimmten Höhe der Spannung über den Transistor T1 den Thyristor Th1 zu zünden. Wenn Th1 leitend wird, zieht auch das Relais Rel1 an und trennt dadurch den Verbraucher vom Netz, der bis dahin unmittelbar über rel 1 am Netz angeschlossen war. *R1* soll so bemessen sein, daß bei normalem Verbraucherstrom an ihm eine Spannung von 2 V abfällt. Bei gemessenem Nenn-Verbraucherstrom wird es nicht schwerfallen, mit dem Ohmschen Gesetz den Widerstandswert auszurechnen. Beträgt z. B. der gemessene Strom 1,5 A, so wäre ein Widerstand von 1,33 erforderlich. Man wird diesen Wert etwas aufrunden. Mit dem Widerstand *R2* läßt sich die Ansprechempfindlichkeit der Schaltung verändern. Der Widerstand *R4* ist so einzustellen, daß ein Strom von 10 mA fließt. Die Bauelemente D3, *R5* und *C2* vor der Basis des Transistors T1 sind ein Verzögerungsglied. Es hat die Aufgabe, kurzzeitige Lastspitzen (Einschaltströme) zu unterdrücken. Sollten größere Einschaltströme auftreten, so kann man entweder den Wert von *C2* erhöhen, oder wenn das nicht ausreicht, ein Potentiometer mit Schalter benutzen. Die Schaltung ist dann so auszuführen, daß der Schalterkontakt während des Anlaufvorgangs den Zeitkreis nicht mit Spannung versorgt. Selbstverständlich kann dafür auch jeder andere Schalter oder Taster verwendet werden. Die Diode D2 wirkt auch hier als Freilaufdiode. Es wäre noch zu bemerken, daß die Schaltung erst nach Unterbrechung des Haltestroms, d. h. also in diesem Fall bei Abschaltung der Netzspannung, wieder betriebsbereit wird.

4.9. Temperaturregelung

4.9.1. Temperaturregelung für kleinere Verbraucher

Im Haushalt gibt es u. a. Wärmequellen kleinerer Leistung, bei denen oftmals nicht die volle Heizleistung in Anspruch genommen werden soll. So kann die nachstehend beschriebene Schaltung zur

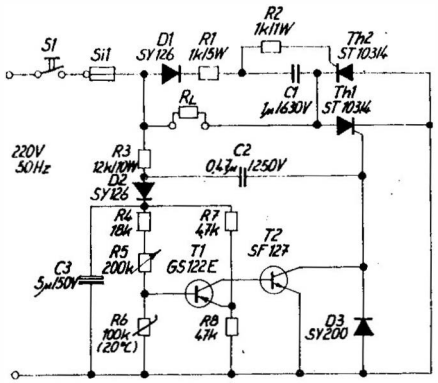


Bild 4.9 Temperaturregelschaltung für kleinere Verbraucher

Temperaturregelung von kleinen Heizkörpern, Heizkissen, Aquarienheizungen, Lötkolben usw. benutzt werden. Die Schaltung selbst besteht in der Hauptsache aus der Temperaturmeßbrücke, die sich aus den Widerständen *R*4 bis *R*8 und dem Transistor T1 zusammensetzt, und den beiden antiparallelen Thyristoren Th1 und Th2 im Laststromkreis. Der Thyristor Th1 erhält seinen Zündstrom über den Kondensator *C*2 jeweils zu Beginn seiner Halbwelle direkt aus dem Netz. Th2 wird dann zu Beginn der anderen Halbwelle durch die Entladung von *C*1 gezündet. *C*1 wurde vorher über D1 und *R*1 aufgeladen. Allerdings ist das nur möglich, wenn Th1 zuvor leitend war und somit ein Ladestrom durch *C*1 fließen konnte. Durch die Antiparallelschaltung der Thyristoren Th1 und Th2 werden beide Halbwellen der Netzwechselspannung ausgenutzt. Man spricht deshalb auch von einer *Vollwellensteuerung*. Von den beiden Thyristoren ist Th1 von der Temperaturmeßbrücke abhängig. Will man z. B. die Raumtemperatur mit einem Heizkörper in etwa konstant halten, so sollte der Temperaturfühler in entsprechender Entfernung zur Wärmequelle angebracht werden. Mit *R*5 wird die Solltemperatur eingestellt. Der Widerstand *R*6 wirkt als Temperaturfühler. Er ist je nach der vorhandenen Wärmequelle in geeigneter Form anzubringen. Niemals direkt auf heiße Stellen oder Flächen anordnen! Ist die gewünschte Temperatur erreicht, werden die Transistoren T1 und T2 leitend. Das bedeutet, daß über die Kollektor-Emitter-Strecke

des Transistors T2 die Steuerelektrode von Th1 kurzgeschlossen wird. Bei der nächsten für Th1 in Frage kommenden Halbwelle zündet dieser Thyristor nicht mehr durch. Der Verbraucher ist damit stromlos. Wenn Th1 nicht leitet, kann, wie bereits oben beschrieben, auch Th2 nicht mehr gezündet werden. Erst wenn die Temperatur so weit abgesunken ist, daß Th1 und T2 gesperrt sind, zünden Th1 und nachfolgend Th2 wieder. Auch hier soll auf einen besonderen Umstand hingewiesen werden. Trotz ausgeschalteten Verbrauchers bei nichtleitenden Th1 und Th2 liegt an der einen Seite des Verbrauchers die volle Netzspannung an. Das ist besonders zu beachten! Muß am Verbraucher aus irgendeinem Grund gearbeitet werden, so ist dieser *grundsätzlich vom Netz zu trennen*! Außerdem muß man beim Temperaturfühler *R6* besonders darauf achten, daß dieser berührungssicher installiert wird, da auch er Netzpotential hat.

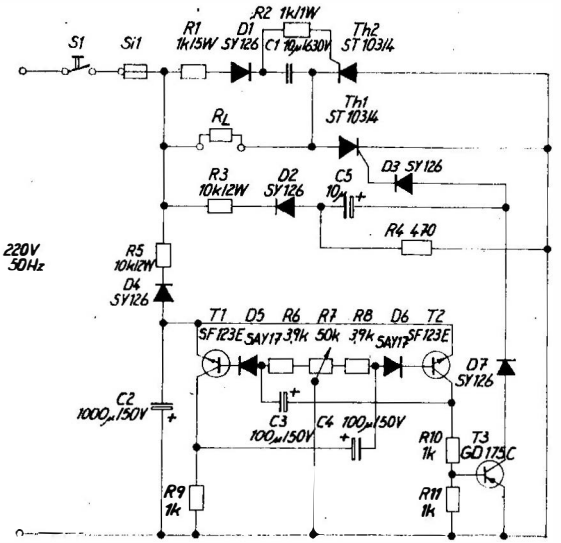


Bild 4.10 Kontinuierlich einstellbare Heizleistung

4.9.2. Kontinuierlich einstellbare Heizleistung

Mit der Schaltung nach Bild 4.10 kann man die an den Heizwiderstand R_L gelieferte Leistung kontinuierlich variieren. Bei Verwendung der angegebenen Thyristoren können für R_L Heizkörper bis zu einer Leistung von 1200 W angeschlossen werden. Der Lastkreis der Schaltung besteht auch hier aus den beiden antiparallelen Thyristoren Th1 und Th2. Damit werden beide Halbwellen der Netzwechselspannung ausgenutzt. Bedingung für das Zünden von Th2 ist, daß vorher Th1 gezündet war. Denn nur dadurch ist es möglich, daß sich der zum Zünden von Th2 erforderliche Kondensator $C1$ vorher aufladen kann. An Stelle einer Temperaturmeßbrücke wird bei dieser Schaltung zum Zünden des Thyristors Th1 ein astabiler Multivibrator benutzt. Die Impulse des Multivibrators werden über den Transistor T3 dem Thyristor Th1 zugeführt. Mit $R7$ läßt sich die Tastfrequenz des Multivibrators kontinuierlich verändern. Durch die Veränderung der Tastfrequenz werden die Thyristoren zu einem früheren bzw. späteren Zeitpunkt gezündet. Das heißt, daß die Thyristoren periodisch für längere oder kürzere Zeit gezündet sind, was schließlich auch eine Veränderung der Heizleistung bedeutet.

4.10. Einfache Drehzahlregelung für Universalmotoren

Universalmotoren, die in Haushaltgeräten oder elektrischen Heimwerkzeugen verwendet werden, sind in der Regel Reihenschluß-Kollektormotoren. Sie können sowohl an Gleichspannung als auch an Wechselspannung angeschlossen werden. Bekanntlich wird im Anker eines Elektromotors durch das Feld Φ und durch den Restmagnetismus des Eisens nach der Beziehung

$$E = c \cdot \Phi \cdot n \qquad (1)$$

eine von der Drehzahl n abhängige Gegenspannung E induziert (c = Konstante). Diese Gegenspannung wird bei der beschriebenen einfachen Schaltung nach Bild 4.11 mit zur Drehzahlregelung ausgenutzt. Vom Prinzip her stellt die Schaltung eine Phasenanschnittsteuerung dar. Mit dem Widerstand $R2$ läßt sich die Drehzahl stufenlos regeln. Durch Verstellen von $R2$ wird der Zündwinkel verändert, was wiederum ein früheres oder späteres

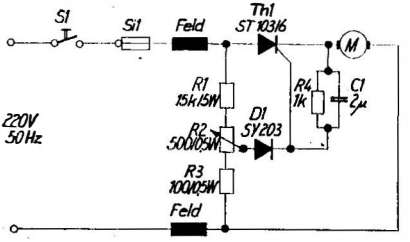


Bild 4.11 Drehzahlregelung für Universalmotoren

Zünden des Thyristors bei jeder positiven Netzhalbwelle bewirkt und somit auch einen größeren oder kleineren Stromfluß durch den Thyristor. Das bedeutet eine größere oder kleinere Drehzahl. Da nur eine Halbwelle der Netzwechselspannung ausgenutzt wird, spricht man in diesem Fall auch von einer *Halbwellensteuerung*. Hierbei ist die Verwendung von 110-V-Motoren sehr vorteilhaft, weil dabei annähernd die volle Leistung erreicht wird. Die mit dem Widerstand $R2$ eingestellte Fest- bzw. Sollspannung bildet mit der Gegenspannung des Motors über $C1/R4$ eine Differenzspannung, die man dann zum Zünden des Thyristors benutzt. Da die Gegenspannung von der Drehzahl und diese wiederum von der Belastung abhängig ist, ergibt sich gleichzeitig eine automatische Drehzahlregelung bei Lastschwankungen. Folgende bekannte Beziehungen sollen helfen, die Vorgänge bei der Drehzahlregelung besser zu verstehen:

$$M_A = c \cdot \Phi \cdot I_A , \tag{2}$$

$$n = \frac{U - I_A \cdot R_A}{c \cdot \Phi} . \tag{3}$$

Bei stärkerer Belastung (durch erhöhte Stromaufnahme I_A) wird dem Motor ein größeres Moment M_A abverlangt (2). Damit steigt der Strom, was wiederum zur Folge hat, daß die Drehzahl n zunächst erst einmal absinkt (3). Eine kleinere Drehzahl hat auch eine kleinere Gegenspannung zur Folge (1). Dadurch zündet, wie bereits angedeutet, der Thyristor innerhalb der positiven Netzhalbwelle früher, dem Motor wird mehr Leistung zugeführt und die Drehzahl schließlich wieder erhöht. Das Umgekehrte tritt ein, wenn man den Motor entlastet. In diesem Fall vergrößert sich

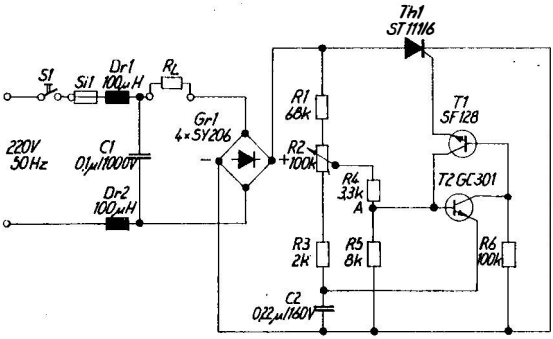


Bild 4.12 Wechselstromsteller mit Transistoren
(Herstellung von Dr1 und Dr2 siehe Vorwort)

der Zündwinkel — der Thyristor zündet später, und die Drehzahl wird heruntergeregelt.

4.11. Drehzahlregulierung mit Wechselstromsteller

Mit Thyristoren lassen sich relativ einfache Schaltungen zur verlustlosen Drehzahlregelung von Elektromotoren aufbauen. Die in Bild 4.12 abgebildete Schaltung zeigt einen Wechselstromsteller, der nach dem Prinzip der Phasenanschnittsteuerung arbeitet. Angewendet wird dieser Wechselstromsteller bei der Drehzahlregelung kleiner Einphasen-Universalmotoren, wie man sie z. B. bei Handbohrmaschinen oder bei Küchen- und Nähmaschinen vorfindet. Weiterhin kann die Schaltung zur Beleuchtungsstärkeregelung (Schmalfilm- bzw. Diavorführungen usw.) oder zur Einstellung der Heizleistung von Wärmequellen benutzt werden.
Der Aufbau der Schaltung ist recht einfach. Sie besteht im wesentlichen aus dem Brückengleichrichter, der der Schaltung eine genau festgelegte Stromrichtung gibt, dem Thyristor Th1 und einer transistorisierten Zündschaltung. Ein sicheres Zünden des Thyristors bewirkt die aus den Transistoren T1 und T2 bestehende Zündschaltung. Die mit $R2$ zu verändernde RC-Schaltung ($R2$, $R3$ und $C2$) ermöglicht eine Phasenverschiebung zwischen Emitter von T2 und Punkt A. Mit $R2$ kann der Zündzeitpunkt des Thyristors in jeder Sinushalbwelle ungefähr zwischen 25° und 170°

gewählt werden. An dieser Stelle sei nochmals auf zwei wichtige Dinge hingewiesen. Das ist, wie bereits im Vorwort erläutert, die Entstörung der Schaltung. Weiterhin liegt auch hier R_L (Bohrmaschine o. ä.) bei nichtgezündetem Thyristor noch am Netz! Zur Vermeidung von elektrischen Unfällen ist dieser Umstand stets zu beachten. Zur Erhöhung der Sicherheit sollte man S2 2polig ausführen.

4.12. Elektronisch geregelte Drehzahl

Die nachfolgend beschriebene Schaltung ist eine Regelschaltung zur Drehzahlregelung von Universalmotoren. Das Prinzip der Schaltung besteht darin, daß die vom Motor erzeugte Ankergegenspannung mit einer einstellbaren Sollspannung verglichen wird. Je nachdem, ob die Ankergegenspannung größer oder kleiner als die Sollspannung ist, wird mit der Regelschaltung der Zündwinkel so verändert, daß man bei wechselnden Belastungsfällen die ursprünglich vorhandene Drehzahl des Motors wieder erreicht.
Die Schaltung besteht aus dem Laststromkreis, der sich aus dem Thyristor Th1 und dem Lastwiderstand (Motor) zusammensetzt,

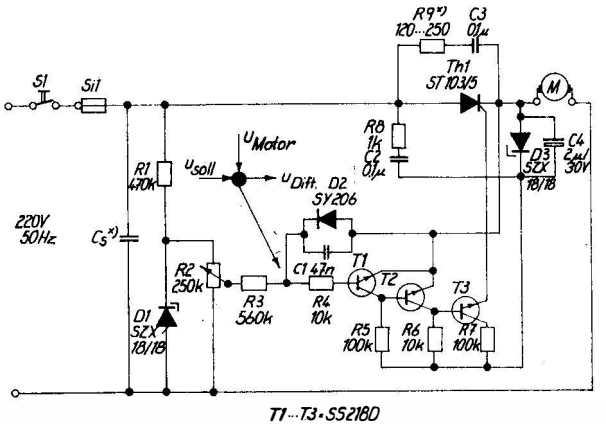


Bild 4.13 Elektronische Drehzahlregelung,
*)Erläuterungen siehe Text

und aus dem Regelteil mit den Transistoren T1 bis T3, der Z-Diode D1 sowie den dazugehörigen Widerständen und Kondensatoren. Die zweite in der Schaltung befindliche Z-Diode D3 hat zwei Aufgaben. Einmal wird über diese Diode der Kondensator $C2$ aufgeladen, und zum anderen wirkt sie als Schutzbeschaltung für die Transistoren vor zu hohen Spannungen. Wie bereits oben angedeutet, soll sich mit der beschriebenen Schaltung die Drehzahl variieren lassen. Darüber hinaus soll die Drehzahl in Abhängigkeit von der Belastung in bestimmten Grenzen so ausgeregelt werden, daß sie nahezu konstant bleibt. Selbst im Bereich kleiner Drehzahlen arbeitete die Schaltung noch zuverlässig. An dieser Stelle sei im Interesse einer einwandfreien Funktion der gesamten Schaltung darauf hingewiesen, daß der Störschutzkondensator C_S der zu regelnden Maschine an der Maschine selbst entfernt und dafür im Netzeingang der Regelschaltung eingebaut wird. Auf keinen Fall darf er ganz entfallen.

Es wurde bereits erwähnt, daß bei dieser Regelschaltung zwei Spannungen miteinander verglichen werden. Die sich herausbildende Differenzspannung wird dann zur entsprechenden Vergrößerung bzw. Verkleinerung des Zündwinkels benutzt. Auch bei der negativen Halbwelle, bei der der Motor in der beschriebenen Schaltung stromlos ist, entsteht eine Gegenspannung auf Grund des Restmagnetismus der Eisenteile des Motors. Diese Gegenspannung ist nach der unter 4.10. erwähnten Gleichung (1) der Drehzahl direkt proportional. Die Z-Diode D1 stellt eine definierte Spannung bereit, die mit der vom Anker des Motors gelieferten Gegenspannung verglichen wird. Wenn die vom Motor kommende Spannung kleiner ist als die von der Z-Diode gelieferte, bewirkt die an T1 geführte Differenzspannung eine Aufsteuerung dieses Transistors. Damit wird aber der bis dahin leitende Transistor T2 gesperrt und der Transistor T3 leitend. Im selben Moment, wo T3 leitend wird, entlädt sich der Kondensator $C4$ über die Kollektor-Emitter-Strecke von T3 und zündet somit den Thyristor Th1. Der Kondensator $C4$ übernimmt bei jeder positiven Halbwelle die Ladung von $C2$. $C2$ wiederum wird bei jeder negativen Halbwelle über $R8$ und D3 aufgeladen. Nun noch einige Bemerkungen zur eigentlichen Drehzahlregelung. Mit dem Widerstand $R2$ kann die Drehzahl stufenlos verändert werden. Mit den ebenfalls unter 4.10. erwähnten Gleichungen (2) und (3) für elektrische Maschinen soll der Regelvorgang bei sich ändernder Be-

lastung erklärt werden. Angenommen, man belastet beim Bohren z. B. durch stärkeres Andrücken der Bohrmaschine die Maschine mehr, d. h., es wird dem Motor ein größeres Drehmoment abverlangt. Damit steigt nach Gleichung (2) auch der Ankerstrom. Eine Vergrößerung von I_A bedeutet aber nach Gleichung (3) zunächst einen Abfall der Drehzahl, was wiederum nach Gleichung (1) zu einer kleineren Gegenspannung führt. Die nun insgesamt kleiner gewordene Differenzspannung führt dazu, daß T1 bereits zu einem früheren Zeitpunkt durchschaltet. Der Zündwinkel verkleinert sich, und damit erhöht sich der Stromfluß durch den Motor, und die Ausgangsdrehzahl wird wieder erreicht. Verringert man dagegen die Belastung, so verkleinert sich auch der Ankerstrom nach Gleichung (2), und die Drehzahl steigt nach Gleichung (3). Nach Gleichung (1) wird damit eine größere Gegenspannung geliefert. Die Folge ist, daß T1 zu einem späteren Zeitpunkt durchschaltet, was schließlich zu einem größeren Zündwinkel führt. Die Drehzahl des Motors wird auf diese Weise auf die Ausgangsdrehzahl heruntergeregelt.

Noch ein Hinweis zum Kondensator *C*1. Je nach der Größe des Kondensators ist eine Drehzahlregelung im oberen oder unteren Drehzahlbereich besonders günstig. Ist *C*1 zu groß gewählt worden, so macht sich eine schlechte Drehzahlregelung im oberen Drehzahlbereich bemerkbar. Ein umgekehrtes Verhalten kann man bei zu kleinem Kondensator feststellen. Ein unruhiger Lauf der Maschine im Bereich kleiner Drehzahlen kann ebenfalls die Folge eines falsch dimensionierten Kondensators sein (zu groß!). Sollte man derartige Erscheinungen bemerken, ist der genannte Kondensator in seinem Wert entweder nach oben oder unten zu verändern.

Die Bauelemente *C*3 und *R*9 gehören zur Träger-Staueffekt-Beschaltung (TSE-Beschaltung). Besonders bei induktiven Verbrauchern werden nach dem Abschalten des Thyristors in den Induktivitäten des Kommutierungskreises Spannungsspitzen erzeugt, die sich mit der bereits anliegenden Sperrspannung überlagern. Je nach der Größe der induktiven Komponente des Verbrauchers muß *R*9 innerhalb der in Bild 4.13 angegebenen Werte abgeglichen werden. Das Abgleichen kann man z. B. in der Form vornehmen, daß man mit einem Oszillografen die Spannung am Thyristor kontrolliert. *R*9 wird dabei so eingestellt, daß die am Thyristor auftretenden Spannungsspitzen ihren minimalen Wert

erreichen. Der Widerstandswert für $R9$ kann sogar in Einzelfällen bis zu 47 Ω und weniger betragen. Für Thyristoren vom Typ *ST 111/...* werden für die TSE-Beschaltung folgende Werte angegeben:

$C = 0{,}22\ \mu F \qquad R = 47\ \Omega;$

diese Werte sind Richtwerte!

4.13. Temperaturabhängige Motorsteuerung

Manchmal möchte man die Drehzahl eines Ventilators den jeweiligen Temperaturverhältnissen eines Raumes anpassen. So wird man meist bestrebt sein, bei höheren Temperaturen mehr Luft umzuwälzen, d. h., man wird den Ventilator mit einer größeren Drehzahl betreiben. Sehr gut eignet sich auch die vorliegende Schaltung für Heizanlagen, bei denen die erwärmte Luft mit einem Ventilator in den Wohnraum befördert wird. Ist es noch kalt, so läßt man den Ventilator schneller drehen. Hat sich der Raum erwärmt, dreht der Ventilator langsamer. Auch Absaugevorrichtungen über Kochstellen lassen sich mit dieser Schaltung sehr gut steuern. Beginnt man zu kochen, so setzt die Schaltung mit größer werdender Wärmeentwicklung die Absaugevorrichtung in Betrieb. Nach beendetem Kochen schaltet sich die Einrichtung von allein wieder aus. Ähnliche Anwendungsfälle wird der findige Bastler selbst noch entdecken. Als Temperaturfühler fungiert ein Thermistor. Er kann an jeder beliebigen Stelle des Raumes untergebracht werden. Wird der Warmluftstrom reguliert, so sollte man den Temperaturfühler nicht in unmittelbarer Nähe der Wärmequelle anbringen.

Die Schaltung selbst besteht wieder aus dem Laststromkreis, der Zündschaltung und der Temperaturmeßbrücke. Bei der Zündschaltung handelt es sich um eine Impulszündschaltung. Der Kondensator $C1$ wird über den Transistor T3 aufgeladen. Je nachdem, wie T3 von der Temperaturmeßbrücke angesteuert wird, lädt sich auch $C1$ schneller oder langsamer auf. Die Transistoren T1 und T2 bilden eine Kippstufe. Übersteigt nun die Ladespannung des Zündkondensators die Schwellwertspannung der Kippstufe, so schaltet diese durch, und $C1$ entlädt sich über Kippstufe und Steuerstrecke von Th1.

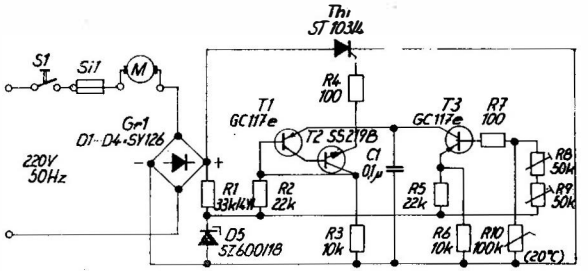


Bild 4.14 Temperaturabhängige Motorsteuerung

Die Temperaturmeßbrücke steuert die Schaltung nun so, daß je nach Temperatur der Thyristor innerhalb einer Halbwelle früher oder später gezündet wird, d. h., der Motor läuft schneller oder langsamer. Auf eine Besonderheit der Temperaturmeßbrücke sei noch verwiesen. Vertauscht man $R5$ mit $R6$ und $R8/R9$ mit $R10$, beginnt der Motor bei Temperaturerhöhung langsamer zu laufen. In der Schaltung nach Bild 4.14 vergrößert sich bei Temperaturerhöhung die Drehzahl des Motors. Für den Temperaturfühler ($R10$) gelten betreffs berührungssicherer Installation die gleichen Hinweise, wie sie bereits in Abschnitt 4.9.1. (dort $R6$) gegeben wurden.

4.14. Überlastschutz für Motoren

Die Schaltung nach Bild 4.15 ist als Überlastschutz für Universalmotoren in üblichen Haushaltsgeräten und Kleinwerkzeugen (besonders Bohrmaschinen) gedacht. Denn nur wenige im Haushalt verwendete Geräte mit Elektromotoren haben außer Sicherungen andere Schutzeinrichtungen eingebaut, die bei Überlastungen (die aber noch kein Kurzschluß sind!) die Maschine vor Schaden bewahren.

Die Schaltung garantiert einen schnellen und sicheren Überlastschutz mit Abschaltung. Das heißt, daß bei einer auftretenden Überlastung die Maschine abgeschaltet wird und erst durch erneute Eintastung von Hand wieder in Betrieb genommen werden kann. Besonders zu beachten ist hierbei allerdings, daß nach einer Abschaltung der Motor selbst noch am Netz liegt! Das ist beson-

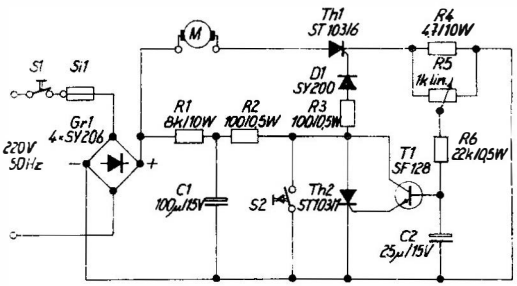


Bild 4.15 Überlastschutz für Universalmotoren

ders bei eventuell notwendig werdenden Reparaturarbeiten zu berücksichtigen! In einem solchen Fall *Maschine vom Netz trennen*! Die Schaltung ist so aufgebaut, daß der von der Belastung abhängige Motorstrom dazu benutzt wird, bei Überschreitung eines bestimmten Wertes die Abschaltautomatik auszulösen. Über den Gleichrichter Gr1 wird Schaltung mit Gleichspannung versorgt. Der Motor selbst arbeitet mit pulsierendem Gleichstrom. Im Lastkreis befindet sich außer dem Motor und dem Thyristor Th1 noch der Shunt *R*4. Der Spannungsabfall über *R*4 steigt proportional mit der Belastung. Mit dem Widerstand *R*5 ist es möglich, die Ansprechschwelle der Schaltung zu verändern. Eine Anpassung an die unterschiedlichsten Belastungsfälle ist damit möglich. Die Zündspannung, über *R*2, *R*3 und D1 an die Steuerelektrode von Th1 geleitet, wird mit *C*1 erzeugt. Der Kondensator *C*1 lädt sich über den Widerstand *R*1 auf. Zu Beginn jeder Halbwelle wird somit der Thyristor Th1 automatisch gezündet und bei Nulldurchgang der Spannung wieder gelöscht. Vergrößert sich nun infolge einer höheren Belastung des Motors der Strom, so steigt auch proportional dazu der Spannungsabfall über *R*4. Der Widerstand *R*4 ist so auszulegen, daß über ihn eine so große Spannung abfällt, die dann den Transistor T1 aufsteuert. Bei Maschinen mit kleiner Stromaufnahme muß man *R*4 entsprechend größer wählen. Die Kombination *R*6/*C*2 ist ein Zeitglied. Mit diesem Zeitglied sollen die bei kurzzeitigen Belastungen (u. a. auch erhöhte Stromaufnahme im Einschaltmoment) auftretenden Spannungsspitzen abgefangen werden. Mit der Durchschaltung von T1 wird der Thyristor Th2 gezündet. Dadurch erhält der

Thyristor Th1 nicht mehr die erforderliche Zündspannung und zündet bei Beginn der nächsten Halbwelle nicht mehr durch. Der Motor wird somit ausgeschaltet. Dieser Zustand dauert so lange, wie auch Th2 gezündet ist. Soll der Motor wieder in Betrieb gesetzt werden, muß man Th2 in den nichtleitenden Zustand versetzen. Dazu drückt man die Taste S2. Th2 wird überbrückt und dadurch der Stromfluß unterbrochen. Th1 erhält nun wieder zu Beginn jeder Halbwelle seine Steuerspannung, und damit beginnt auch der Motor wieder zu laufen. Am Schluß dieses Abschnitts sei noch auf einen Umstand bei der Verwendung moderner Universalmotoren verwiesen. Um diese Maschinen thermisch optimal auszunutzen, sind sie oft äußerst knapp dimensioniert. Der hier beschriebene Halbwellenbetrieb ist deshalb für einige Motoren unzulässig (Herstellerhinweis beachten!). Auf jeden Fall sollte bei erstmaligen Erprobungen der Schaltung besonders auf Überlastungserscheinungen des jeweiligen Motors geachtet werden.

4.15. Stufenlose Helligkeitssteuerung von Glühlampen

Manchmal besteht der Wunsch, die Helligkeit von Glühlampen stufenlos zu regeln. So kann z. B. die beschriebene Schaltung zur allmählichen Abdunklung des Raumes bei Schmalfilmvorführun-

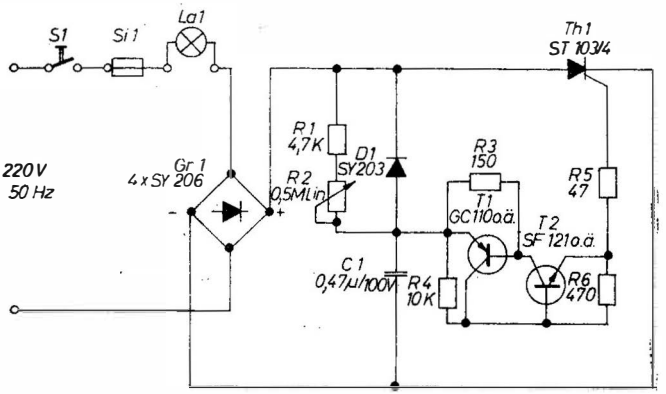


Bild 4.16 Helligkeitssteuerung für Glühlampen

gen oder zur optimalen Anpassung der Arbeitsplatzbeleuchtung an die übrige Raumbeleuchtung (bei Foto- oder Zeichenarbeiten) benutzt werden. Setzt man zwischen die Widerstände *R*1 und *R*2 an die Stelle des veränderlichen Widerstands einen Fotowiderstand (z. B. Typ *FO-K 5* von *Unitra* VR Polen oder *WK 650 36* von TESLA ČSSR) bzw. eine lichtabhängige Schaltung, so läßt sich eine automatische Helligkeitsregelung aufbauen. Man könnte damit beispielsweise eine auch bei Tage betriebene Aquarienbeleuchtung der jeweiligen Umweltbeleuchtung anpassen. Beim Einsatz eines Fotowiderstands ist auf dessen Belastbarkeit zu achten. Solche Bauelemente sind im allgemeinen für Spannungen zwischen 10 bis 100 V geeignet und von 0,05 bis 0,5 W belastbar. Eine *Graetz*-Schaltung versorgt die übrige Schaltung mit der notwendigen Gleichspannung. Am Pluspol der Gleichrichterbrücke entstehen bei jeder Netzhalbwelle positive Halbwellen. Mit jedem Anstieg der Spannung an der Anodenseite des Thyristors wird gleichzeitig über *R*1 und *R*2 der Kondensator *C*1 aufgeladen. Die Funktionsweise der Zündschaltung mit T1 und T2 wurde bereits in Abschnitt 4.3. erläutert. Bei gezündetem Thyristor wird der Gleichrichter Gr1 kurzgeschlossen. Dieser Kurzschluß des Gleichrichters bewirkt, daß jetzt die Lampe La1 brennt. Erst mit dem nächsten Nulldurchgang der Netzspannung wird der Thyristor gelöscht. Durch die Diode D1 entlädt sich *C*1 vollständig. Mit dem Widerstand *R*2 läßt sich die Helligkeit der Glühlampe stufenlos einstellen. Je nach Anwendungsfall ist es zweckmäßig, *R*2 mit S1 zu kombinieren. Die Größe der verwendeten Glühlampe(n) richtet sich nach dem Thyristor. Auch die Gleichrichterbrücke muß entsprechend dimensioniert sein. In der Schaltung sollen Glühlampen bis maximal 200 W verwendet werden. Vom Thyristor her gesehen könnte man allerdings Glühlampen mit einer Gesamtleistung bis zu 600 W steuern. Dann müssen aber, wie bereits angedeutet, andere Dioden in die *Graetz*-Schaltung eingesetzt werden. Auf einen Umstand sei noch hingewiesen. Regelt man die Helligkeit von Glühlampen größerer Leistungen herunter, so stellt man fest, daß das Licht immer gelblicher wird. Dieser Umstand kann die Gemütlichkeit eines Wohnraums fördern. Für eine direkte Arbeitsplatzbeleuchtung ist das ungünstig. Auch ist die Lichtausbeute wesentlich geringer. Bei stark heruntergeregelten Lampen (unter 20 bis 30 %) können sogar bei Netzspannungsschwankungen Flackererscheinungen auf-

treten. Die normale, relativ weiße Farbe der Glühlampe bleibt im Regelbereich zwischen ungefähr 70 bis 100% erhalten. Will man z. B. bei einer Leselampe die Helligkeit so einstellen, daß sie der einer 40-W-Lampe entspricht, so sollte man eine 60-W-Lampe (höchstens 75-W-Lampe) verwenden. In diesem Fall bleibt die weiße Farbe des Lichtes bei herabgeregelter Glühlampe erhalten. Da es sich hier ebenfalls wieder um eine Phasenanschnittschaltung handelt, ist besonders auf die eventuell notwendig werdenden Entstörmaßnahmen zu achten.

4.16. Stufenlose Helligkeitssteuerung von Leuchtstofflampen

Auch bei Leuchtstofflampen ist es möglich, ihre Helligkeit mit einer Thyristorschaltung kontinuierlich zu verändern. Die beiden antiparallelen Thyristoren werden durch netzsynchrone Steuerimpulse gezündet. Der Laststromkreis setzt sich aus einem induktiven und einem ohmschen Anteil zusammen. Infolge des induktiven Anteils steigt zunächst der Laststrom nach dem Zünden der Thyristoren langsam, einer e-Funktion folgend, an. Der aus dem Widerstand $R1$ gebildete ohmsche Anteil des Lastkreises gewährleistet, daß bei nicht mehr vorhandenem Steuerimpuls bereits ein über dem Wert des Haltestroms liegender Laststrom fließt. Bei Verwendung anderer Thyristortypen ist $R1$ entsprechend auszu-

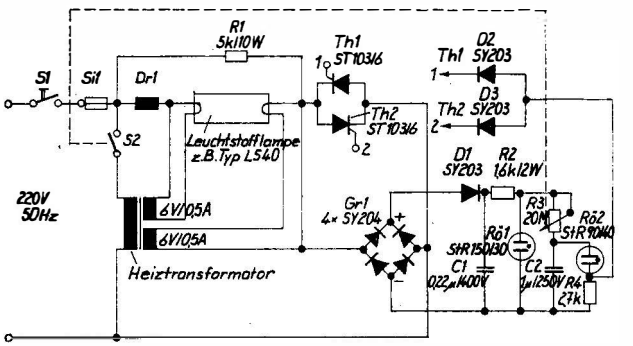


Bild 4.17 Stufenlose Helligkeitssteuerung von Leuchtstofflampen

wählen. Den Heiztransformator muß man deshalb vorsehen, weil bei heruntergeregelter Helligkeit die Elektroden der Leuchtstofflampe ungenügend vorgeheizt werden und damit die Funktion der Lampe selbst in Frage gestellt wird. Wie man aus Bild 4.17 erkennen kann, ist der Schalter S2 mit dem veränderlichen Widerstand *R*3 direkt verbunden. S2 ist nun so anzuschließen, daß bei der größten Helligkeit der Leuchtstofflampe der Heiztransformator außer Betrieb gesetzt wird. Bei der Drossel Dr1 handelt es sich um die Drossel, die man bekanntlich für jede Leuchtstofflampe benötigt. Der die netzsynchronen Steuerimpulse liefernde Impulsgenerator arbeitet nach dem Prinzip eines Kippgenerators mit Glimmlampe. Über den Widerstand *R*3 wird der Kondensator *C*2 aufgeladen. Hat er die Zündspannung von Rö2 erreicht, so zündet diese. Damit kann sich der aufgeladene Kondensator *C*2 über *R*4 und Rö2 entladen. Ist die als Schaltdiode arbeitende Glimmlampe Rö2 nach der Entladung wieder erloschen, beginnt ein neuer Aufladevorgang. Die entstehenden positiven Impulse werden über *R*4 abgegriffen und den beiden Thyristoren zugeführt. Mit dem veränderlichen Widerstand *R*3 läßt sich die Impulsfolgefrequenz und damit die Helligkeit der Leuchtstofflampe einstellen. Mit D2 und D3 werden gleichzeitig die negativen Netzspannungshalbwellen von der Zündimpulszuleitung ferngehalten. Die Zündimpulse müssen nun so zu den beiden Thyristoren gelangen, daß der Zündimpuls für Th1 positiv gegenüber der Katode von Th1 und für Th2 positiv gegenüber der Katode von Th2 ist. Die richtige Polung der Zündimpulse erfolgt auf elektrischem Wege. Der Thyristor Th1 hat Zündbereitschaft, wenn die positive Netzhalbwelle an seiner Anode liegt. Ist das der Fall, so liegt an der Katode die negative Halbwelle an. In diesem Augenblick ist die Katode von Th1 über die linke untere Diode des Gleichrichters Gr1 mit der Minusseite des Impulsgenerators verbunden, und der Thyristor Th1 wird von dem über R4 abgegriffenen positiven Impuls gezündet. Im gleichen, eben geschilderten Augenblick ist die Katode von Th2 durch die in diesem Moment gesperrte untere rechte Diode von Gr1 vom Impulsgenerator getrennt. Beim Nulldurchgang der Spannung wird Th1 wieder gelöscht. Bei der nun folgenden anderen Netzhalbwelle wiederholt sich der gleiche Vorgang, nur diesmal für Th2. Hierbei stellt die untere rechte Diode von Gr1 die Minusverbindung der Katode von Th2 zum Impulsgenerator her, und die untere linke Diode

von Gr1 trennt entsprechend der Polung die Katode des Thyristors Th1 vom Impulsgenerator. Th2 ist ebenfalls bis zum nächsten Nulldurchgang der Spannung leitend.

4.17. Ladegerät für Kleinakkumulatoren

Die in Bild 4.18 dargestellte Schaltung ermöglicht das Laden von Kleinakkumulatoren mit automatischer Begrenzung des Ladestroms. Dadurch wird eine Überladung der Zellen verhindert, was besonders wichtig für die Haltbarkeit gasdichter Ausführungen ist. Das Prinzip der Schaltung besteht darin, daß beim Ladevorgang mit steigender Batteriespannung der Ladestrom durch Phasenanschnitt zurückgeregelt wird. Die Lampe La1 beginnt schließlich bei entsprechend weit heruntergeregeltem Ladestrom zu flackern. Das zeigt gleichzeitig an, daß der Ladevorgang kurz vor seinem Ende ist.

Bei der Betrachtung der Schaltung muß man davon ausgehen, daß an die Klemmen 1 und 2 eine entladene Batterie bzw. ein Kleinakkumulator angeschlossen wird. Auf Grund der zu Beginn des Ladevorgangs vorhandenen geringen Spannung der zu ladenden Batterie ist zunächst der Transistor T2 nicht leitend. Die Transistoren T1 und T2 mit den dazugehörigen Bauelementen bilden den Regelteil der Schaltung. Mit $R2$ stellt man die Vergleichsspannung so ein, daß bei noch gesperrtem Transistor T2 der Transistor T1 leitet.

Der Kollektorstrom von T1 steuert den Transistor T3 auf, so

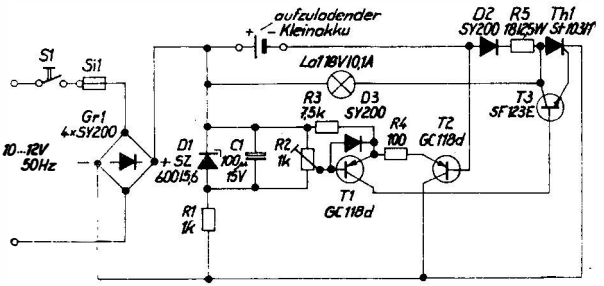


Bild 4.18 Ladegerät für Kleinakkumulatoren

daß Th1 gezündet wird und der Ladestrom zu fließen beginnt. Zu Beginn des Ladevorgangs ist ein großer Stromflußwinkel vorhanden. Das bedeutet, daß ein relativ hoher Ladestrom fließt. Der Ladevorgang wird durch das Leuchten der Lampe La1 angezeigt. La1 hat gleichzeitig noch eine zweite Funktion zu erfüllen. Durch die Lampe wird gewährleistet, daß, noch bevor der Augenblickswert der Eingangsspannung den Wert der Batteriespannung überschritten hat, ein Strom durch den Thyristor fließt, der größer als der Haltestrom des Thyristors ist. Mit der allmählich größer werdenden Batteriespannung wird schließlich auch der Transistor T2 immer mehr aufgesteuert. Ein immer größer werdender Strom fließt über die Emitter-Kollektor-Strecke von T2. Das wirkt sich auf den Regelteil der Schaltung so aus, daß T3 zu einem späteren Zeitpunkt leitend wird, als das vorher der Fall war. Das bedeutet für Th1 einen kleineren Stromflußwinkel. Der Ladestrom nimmt ab, bis schließlich, wie bereits oben beschrieben, die Lampe La1 zu flackern beginnt. Der Ladevorgang ist beendet.
Das Ladegerät eignet sich, wie bereits in der Überschrift genannt, speziell zum Aufladen von Kleinakkumulatoren. Demzufolge ist auch der Ladestrom nicht sehr hoch, er beträgt etwa 200 mA. Akkumulatoren können mit Spannungen von $\leqq 6$ V geladen werden. Die Ladespannung des sich über $R1$ aufladenden Kondensators wird durch die Z-Diode D1 begrenzt. Führt man $R5$ als regelbaren Widerstand aus, so kann man den Ladestrom nach Wunsch einstellen. Beim Öffnen von S1 und weiterhin angeschlossenem Akkumulator kommt es zu einer Entladung des bereits aufgeladenen Akkumulators (über $R2$, D3, $R3$, $R4$, T2). Deshalb muß sofort nach Beendigung des Ladevorgangs der Akkumulator vom Ladegerät abgeklemmt werden. Wird mit Netzspannungsausfällen während des Ladevorgangs gerechnet, muß man die Schaltung mit einem Relais so verändern, daß bei fehlender Netzspannung der zu ladende Kleinakkumulator galvanisch vom Ladegerät getrennt ist.

4.18. Kurzschlußfestes Netzteil

Es wird eine Schaltung nach [15] beschrieben, die eine Überstromsicherung darstellt und hauptsächlich bei nur kurzzeitig andauernden Kurzschlüssen (beispielsweise Überschläge in Endstu-

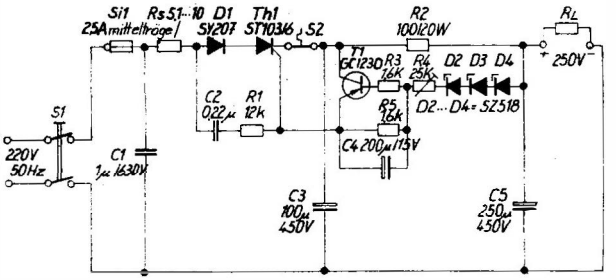


Bild 4.19 Kurzschlußfestes Netzteil

fen von Fernsehempfängern) den Ausfall des angeschlossenen Geräts verhindern soll. Selbstverständlich kann die in Bild 4.19 dargestellte Schaltung auch anderweitig als elektronische Überstromsicherung eingesetzt werden. Von Fall zu Fall sind dabei eventuell kleine Veränderungen im Schaltungsaufbau erforderlich.

Die benötigte Gleichspannung erzeugt eine Einweggleichrichtung über die Diode D1, den Thyristor Th1 und mit der angeschlossenen Siebkette mit *C*3, *C*5 und *R*2. Über *C*2 und *R*1 wird der Thyristor Th1 durch die Netzwechselspannung angesteuert und gezündet. Der Zündkondensator *C*2 wird dabei immer abwechselnd positiv und negativ aufgeladen. Er liefert die für den Thyristor Th1 notwendige Zündspannung, die der Widerstand *R*1 auf etwa 3 V begrenzt (gegebenenfalls *R*1 verändern). Jeweils die positiven Halbwellen bewirken, daß der Thyristor in den leitenden Zustand versetzt wird.

Der Transistor T1 mit dem dazugehörigen Netzwerk verhindert nun, daß bei Kurzschluß bzw. erhöhter Stromaufnahme durch den angeschlossenen Verbraucher der Thyristor zündet. Steigt der Strom durch einen Defekt des angeschlossenen Verbrauchers, so wird auch der Spannungsabfall über *R*2 größer. Diese größer gewordene Spannung über *R*2 bewirkt eine Aufsteuerung des Transistors T1. Bei aufgesteuertem Transistor T1 schließt dessen Emitter-Kollektor-Strecke die Steuerelektrode und die Katode des Thyristors Th1 kurz. Damit wird der Thyristor nicht mehr gezündet und folglich die Stromzufuhr zum Verbraucher unterbrochen. Beim Kurzschluß tritt zunächst eine Stromunterbrechung für etwa 100 bis 140 ms auf (je nach Dimensionierung von

$C4$ und $R5$). Während dieser Zeit, in der sich der Thyristor Th1 im nichtleitenden Zustand befindet, entlädt sich der Kondensator $C3$ über $R2$ und der Kurzschlußstrecke im angeschlossenen Verbraucher. Diese Entladung von $C3$ bewirkt einen kleiner werdenden Spannungsabfall über $R2$. Das führt dann schließlich nach einer ebenfalls erfolgten Entladung von $C4$ wieder zu einer Unterbrechung des Stromflusses über die Emitter-Kollektor-Strecke von T1 — der Thyristor Th1 kann wieder gezündet werden. Liegt der Kurzschluß im Verbraucher immer noch an, so wird erneut abgeschaltet. Das geht bei einem dauernd vorhandenem Kurzschluß so lange, bis der eingebaute thermische Schalter S2 (z. B. Bimetall, thermisches Überstromrelais eines Luftschützes o. ä.) den Strom gänzlich unterbricht. Handelt es sich um einen nur kurzzeitig auftretenden Kurzschluß, dann stellt sich sofort wieder die normale Betriebsspannung ein. Die Sicherung Si1 wurde vorgesehen, um den Thyristor bei einem eventuellen Versagen der Abschaltautomatik sicher zu schützen. Der Wert für den Widerstand $R2$ ist ein Richtwert. Um ein einwandfreies Arbeiten der Abschaltautomatik zu gewährleisten, muß je nach Laststrom $R2$ vergrößert oder verkleinert werden. Ebenfalls je nach der Größe des Laststroms richtet sich die Dimensionierung der Diode D1. Für Fernsehgeräte, Phonogeräte u. ä. dürfte der angegebene Typ in den meisten Fällen ausreichend sein. Der Widerstand R_S wirkt als Schutz gegen Überstrom im Einschaltmoment bei entladenem Kondensator. Bei Verwendung eines Widerstands von 5 Ω ist dieser für eine Nennverlustleistung von 15 W auszulegen (bei 10 Ω für 25 W). Die beschriebene Schaltung sollte lediglich die Möglichkeit des Einsatzes von Thyristoren in Netzteilen zeigen. Weitere Beispiele findet der interessierte Leser bei [28] sowie ausführliche theoretische Betrachtungen zu Thyristor-Netzteilen bei [29].

5. Montage, Prüfungen und Versuchsaufbau

5.1. Hinweise zur Montage und Wartung, Fehlerquellen

Wie alle Halbleiterbauelemente, so sind auch Thyristoren wartungsfrei. Staub und Verschmutzungen anderer Art sollten allerdings von Zeit zu Zeit entfernt werden. Besonders ist darauf bei den Isolationsstrecken zu achten. Auch der feste Sitz der Thyristoren sollte ab und zu überprüft werden. Das wird besonders dann nötig sein, wenn Thyristoren in Fahrzeugen eingesetzt sind. Durch die ständigen Erschütterungen besteht die Möglichkeit, daß sich die Thyristoren lockern. Kritisch ist das bei Thyristoren, die auf Kühlkörpern befestigt sind. Hier bedeutet eine lockere Befestigung des Thyristors gleichzeitig einen schlechten Wärmeübergang. Die Wirkung des Kühlkörpers wird auf diese Weise wesentlich geschwächt, die Wärmeableitung erschwert und dadurch im Extremfall der Thyristor unbrauchbar.
Für den einwandfreien Betrieb von Thyristoren müssen einige Montagehinweise beachtet werden. Zunächst werden die kontaktgebenden Flächen vor dem Einschrauben in den Kühlkörper auf Sauberkeit (Oxidschicht, Staub, Farbe usw.) geprüft. Auch auf einen einwandfreien Zustand der Gewinde sollte man achten. Als sehr vorteilhaft hat sich das Fetten der Kontakt- und Auflageflächen erwiesen. Wegen eines guten Wärmeübergangs werden dazu vorzugsweise Silikonfette verwendet. Für diesen Verwendungszweck kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt das Silikonfett *NP* 42 empfohlen werden. Durch das Fetten verhindert man eine mögliche elektrolytische Spannungskorrosion. Gleichzeitig wird dadurch die Auswechslung beschädigter Bauelemente erleichtert. Beim Festschrauben von Thyristoren sollte man nicht allzu rohe Kräfte walten lassen. Es kann sonst zu mechanischen Beschädigungen des Thyristors kommen, die schließlich seine Funktionsweise stark beeinträchtigen können. Thyristoren dürfen deshalb höchstens mit dem in den Datenblättern angegebenen Drehmoment festgeschraubt werden. Nur so ist ein guter und fester Sitz der Thyristoren gewährleistet. Denn beim Einschrauben eines Thyristors in den Kühlkörper gibt es keine zusätzlichen

Maßnahmen, die ein Lösen der Schraubverbindung verhindern. Sehr zu empfehlen ist die Benutzung eines Drehmomentenschlüssels. Beim Aufsetzen eines Steckschlüssels ist darauf zu achten, daß dieser genau senkrecht gehalten wird. Verkantet man den Schlüssel, so kann man unter Umständen das Gehäuse des Thyristors beschädigen und damit den Thyristor unbrauchbar machen (Bruch oder Undichtwerden des Gehäuses). Auch ist beim Einschrauben darauf zu achten, daß nicht die Steueranschlüsse beschädigt werden. Die flexiblen Katodenanschlüsse sind so anzuschließen, daß sie nicht zu straff (Zugkräfte auf Thyristorgehäuse), aber auch nicht zu locker (Berührung mit anderen Bauelementen oder mit dem Gehäuse, Kurzschluß, usw.) sind.

Nun sollen noch einige typische Störungen bei Thyristoren bzw. Thyristorschaltungen erwähnt werden.

Wie bei allen anderen Halbleiterbauelementen müssen auch beim Thyristor die in den Datenblättern angegebenen Grenzwerte exakt eingehalten werden. Eine oft auftretende Ausfallursache von Thyristoren ist eine hohe Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt. Um den Ausfall eines Thyristors durch eine zu hohe Stromanstiegsgeschwindigkeit von vornherein zu vermeiden, muß man darauf achten, daß der di/dt-Wert laut Datenblatt bis zu dem festgelegten Stromscheitelwert nicht überschritten wird. Das darf auch nur dann bei hohen und steilen Steuerimpulsen voll ausgenutzt werden. Werden die zulässigen Werte überschritten, so muß der Thyristor nicht gleich ausfallen. Das ist meist dann erst der Fall, wenn man die Nenntemperatur des Thyristors erreicht. Bekanntlich sinkt ja der zulässige di/dt-Wert mit zunehmender Temperatur. Die Frage nach einer zu hohen Stromanstiegsgeschwindigkeit tritt besonders bei induktiven Verbrauchern auf.

Eine weitere, häufige Ursache des Ausfalls bzw. der Zerstörung von Thyristoren ist eine unzulässig hohe Spannungsbeanspruchung. Wird der laut Datenblatt angegebene Spitzenwert überschritten, so kann der Thyristor unbeabsichtigt zünden oder gar zerstört werden. Durch steil in Blockierrichtung ansteigende Spannungen, wie sie beispielsweise bei Schalthandlungen auftreten können, kann es ebenfalls zu einem ungewollten Zünden und einer damit verbundenen eventuellen Zerstörung des Thyristors kommen. Auch das du/dt-Verhalten eines Thyristors ist stark temperaturabhängig, so daß, genau wie beim di/dt-Verhalten

erläutert, Störungen durch zu große du/dt-Beanspruchung erst beim Erreichen der Nenntemperatur voll wirksam werden.

Falsch bemessene *RC*-Beschaltungen, die man zum Schutz vor Überspannung bzw. zur Beseitigung des Trägerstaueffekts einsetzt, lassen sich ebenfalls häufig als Ursache dafür feststellen, daß Thyristoren unbrauchbar werden. Diese falsch dimensionierten Beschaltungen können steile Stromanstiege in den Thyristoren zur Folge haben. Sie liegen oft über den durch den Laststrom erzeugten Werten. Man sollte sich stets merken: *Eine ungedämpfte Entladung von Kondensatoren über Thyristoren ist unzulässig!* Werden Thyristoren durch Überströme unbrauchbar, so ist die jeweilige Schutzeinrichtung und deren richtige Dimensionierung zu überprüfen.

Außer am Thyristor selbst treten noch Fehler im Steuerkreis auf. Es kann sofort auf einen Fehler im Steuerkreis geschlossen werden, wenn sich z. B. bei geschlossenem Lastkreis und anliegender Spannung die Thyristorschaltung nicht in Betrieb setzen läßt. Zunächst ist zu untersuchen, ob die Steuereinrichtung überhaupt richtig arbeitet. Bei Eigenbauschaltungen tritt manchmal der Fall auf, daß der von der Steuereinrichtung gelieferte Zündstrom bzw. die Zündspannung nicht groß genug ist. Ein Zünden des entsprechenden Thyristors wird somit unmöglich. Das tritt meistens bei Anwendung größerer Thyristortypen mit großem Steuerstrombedarf auf. Am einfachsten überprüft man die Steuereigenschaften eines Thyristors, indem man die eigentliche Steuereinrichtung von der Steuerelektrode abklemmt und dafür eine Taschenlampenbatterie anschließt. Auf richtige Polung ist dabei selbstverständlich zu achten, d. h., der Pluspol der Batterie muß an die Steuerelektrode gelegt werden. Fehlt bei einem überprüften und an die Steuerelektrode des Thyristors angeschlossenen Steuergerät die Spannung, so muß man die Ursache meist in einem Kurzschluß der Steuerstrecke des Thyristors suchen. Für den Zündvorgang wichtig und bei Nichtbeachtung häufige Fehlerursache ist die richtige Höhe bzw. die richtige Zeitdauer der Zündimpulse. Am Ende des Zündvorgangs muß der Laststrom gleich oder größer als der Haltestrom sein. Andernfalls bleibt der Thyristor nicht leitend. Dieser Sachverhalt ist besonders bei induktiven Verbrauchern zu beachten, da ja beim Einschalten solcher Verbraucher der Laststrom nach einer e-Funktion lang-

sam ansteigt. In Zweifelsfällen sind auch hier oszillografische Messungen vorzunehmen.
Außer den genannten Hinweisen gelten selbstverständlich für Thyristoren in der Regel auch alle weiteren allgemeinen Hinweise, wie sie von den anderen Halbleiterbauelementen her bekannt sind. Unter 5.2. ist ein einfaches Thyristorprüfgerät beschrieben, das eine schnelle und unkomplizierte Überprüfung von Thyristoren gestattet.

5.2. Einfaches Prüfgerät für Thyristoren

Um Thyristoren schnell auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüfen zu können, sei im folgenden eine einfache Prüfeinrichtung beschrieben, die man ohne großen Aufwand aufbauen kann. Neben dem Prüfen von Thyristoren lassen sich mit der nachstehend beschriebenen Schaltung auch einfache Dioden sowie Triacs überprüfen. An Stelle des eingezeichneten Regeltransformators Tr1 kann auch ein Transformator mit Anzapfungen für unterschiedliche Spannungen oder ein einfacher Trenntransformator 220 V/ 220 V benutzt werden. In diesem Fall erübrigt sich das Meßgerät G1. Ein regelbarer Transformator hat aber den Vorteil, daß man eine der Sperrspannung des zu überprüfenden Thyristors entsprechende Prüfspannung einstellen kann. Über den Schalter S1 wird der zu überprüfende Thyristor gezündet. Mit $R2$ läßt sich der Zündstrom kontinuierlich in bestimmten Grenzen verändern. Das ist besonders dann von Vorteil, wenn man die Zündempfindlichkeit eines Thyristors feststellen will. Bei Thyristoren mit großem Zündstrombedarf wird der Schalter S1 in die Stellung „2" gebracht. In diesem Fall wird der Zündstrom über $R4$ einreguliert. Mit dem Meßgerät G2 kann der Zündstrom kontrolliert werden. Ist der Thyristor in Ordnung, so darf zunächst bei offenem Schalter S1 keine der beiden Lampen aufleuchten. Wird dann der Thyristor über S1 gezündet, so darf nur die Lampe La1 aufleuchten. Brennt La1, bevor der zu überprüfende Thyristor gezündet wurde, so ist der Thyristor auf Grund eines Fehlers in seinem Inneren defekt. Bei zu geringer Sperrwirkung des Thyristors brennen beide Lampen. Bei einer Unterbrechung in dem zu überprüfenden Bauelement leuchtet keine der beiden Lampen auf. Wie bereits angedeutet, können mit der in Bild 5.1 dargestellten

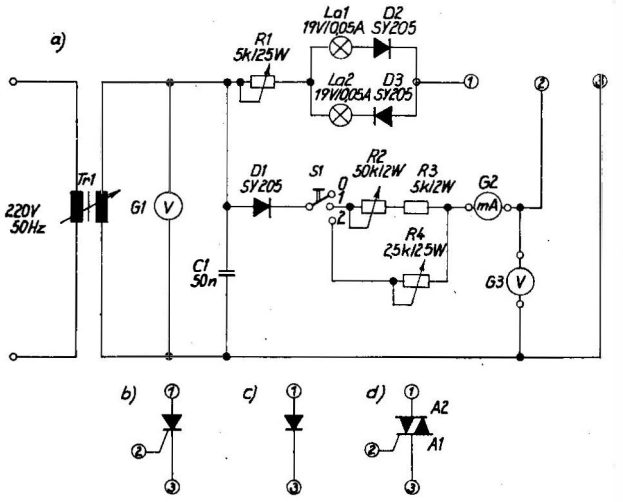


Bild 5.1 Einfaches Thyristorprüfgerät;
a — Gesamtschaltung, b — Anschluß bei Thyristorprüfung, c — Anschluß bei Diodenprüfung, d — Anschluß bei Prüfung eines Triacs

Schaltung auch Dioden und Triacs auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft werden. Ist die Diode voll funktionsfähig, dann darf wieder nur die Lampe La1 aufleuchten. Leuchten beide Lampen, so hat die zu überprüfende Diode kein Sperrverhalten mehr und ist damit unbrauchbar. Wie bei der Thyristorüberprüfung bereits geschildert, leuchtet auch bei den Dioden im Fall einer Unterbrechung keine der beiden Lampen auf. Triacs vereinen bekanntlich 2 Thyristorsysteme. Je nach Betriebsart und Herstellungstechnologie haben diese Systeme eine unterschiedliche Zündempfindlichkeit. Zur Überprüfung von Triacs benutzt man den veränderlichen Widerstand $R2$. Zunächst wird $R2$ so eingestellt, daß der geringstmögliche Zündstrom fließt. Sind beide Systeme des Triacs in Ordnung, leuchtet bei allmählicher Erhöhung des Zündstroms (Verringerung des Widerstandswerts von $R2$) erst La1, später La2 auf.

Ist die benutzte Prüfspannung $\leqq 220$ V, so können für die regelbaren Widerstände $R1$ und $R4$ auch solche kleinerer Leistung

(etwa 10 W) verwendet werden. Mit dem Meßgerät G3 wird die Zündspannung kontrolliert; es kann aber auch entfallen.

5.3. Bemerkungen zum Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Versuche wurde das in Bild 5.2 abgebildete Experimentierchassis benutzt. Die Bauelemente können ohne großen Aufwand schnell, sicher und übersichtlich befestigt werden. Sind elektrische Messungen durchzuführen, kommt man überall bequem heran. Außerdem ist ein leichter Austausch von Bauelementen, der ja beim Experimentieren häufig notwendig wird, durchzuführen. Das Experimentierchassis wird aus Hartpapier hergestellt. Die Größe ist dabei im Prinzip jedem selbst überlassen. Im vorliegenden Fall betragen die Abmessungen 200 mm × 200 mm × 3 mm, was sich als völlig ausreichend erweist. Die Löcher haben einen Abstand von 10 mm zueinander und einen Durchmesser von 2,5 mm. Als Füße werden Senkschrauben M 6×30 verwendet, die man wegen des besseren Aussehens mit passendem Ölschlauch überzieht. Außer den Löchern für das Lochraster werden noch weitere Löcher mit unterschiedlichen Durchmessern gebohrt. Sie dienen zur Aufnahme der unterschiedlichsten Bauelemente wie Sicherungshalter, Schalter, Potentio-

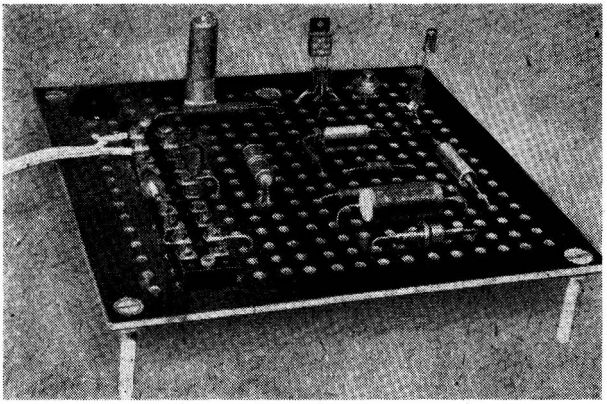


Bild 5.2 Beispiel einer Versuchsschaltung mit Thyristor

meter, Relais usw. Für die Ein- und Ausgänge einer Schaltung sowie zur Zuführung der Betriebsspannungen können Lötösen- oder Klemmleisten verwendet werden. Lötösenleisten haben den Vorteil, daß an einer Verbindungsstelle Drähte mit unterschiedlichem Durchmesser sicher miteinander verbunden werden. Allerdings muß hierbei für Schaltungsänderungen immer ein betriebsbereiter Lötkolben vorhanden sein. Die Verwendung von Klemmleisten ermöglicht zwar ein schnelleres An- bzw. Abklemmen der Verbindungsdrähte, gibt aber bei unterschiedlichen Drahtstärken oft nicht die Gewähr einer sicheren Verbindung. Schließt man Halbleiterbauelemente direkt an eine Klemmleiste an, so hat das den Vorteil, daß die betreffenden Bauelemente thermisch nicht belastet werden. Zum Anschluß der Halbleiterbauelemente wie Dioden, Transistoren und Thyristoren vom *Typ ST 103/...* werden die bekannten Transistorfassungen verwendet. Dadurch vermeidet man beim Anschließen ebenfalls thermische Belastungen dieser Bauelemente, und außerdem ist ein rascher Anschluß bzw. Austausch möglich.

Auf eine gute Wärmeabfuhr bei allen stärker belasteten Bauelementen ist ständig zu achten. Bei den beschriebenen Schaltungen sind für die Thyristoren Kühlbleche mit einer Fläche von 25 bis 100 cm^2 in den meisten Fällen völlig ausreichend. Für Transistoren und Dioden sind die üblichen Kühlsterne bzw. Kühlschellen zu verwenden. Soll eine Schaltung nicht nur zum Experimentieren aufgebaut werden, sondern fest aufgebaut bleiben, dann eignet sich hierzu besonders gut die eventuell noch im Handel erhältliche und in Bild 5.3 dargestellte Leiterplatte aus dem System *Amateurelektronik* des VEB *Meßelektronik* Berlin.

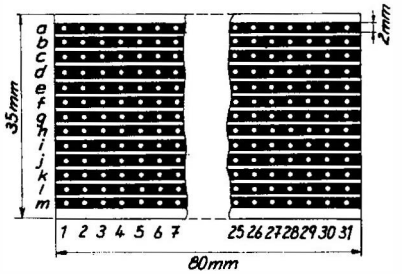


Bild 5.3 Verdrahtungsseite der mit Löchern versehenen Leiterplatte

Diese Platten haben eine Größe von etwa 35 mm × 80 mm, 13 Leiterzüge mit 31 vorgebohrten Löchern je Leiterzug. Der Lochabstand beträgt 2,5 mm. Die Leiterzüge selbst haben eine Breite von etwa 2 mm. [Diese Art von vorgebohrten Leiterplatten ist auch unter dem Namen *Veroboard-System* (nach dem Hersteller, der englischen Firma *Vero Elektronics* Limited in Southampton, benannt) bekannt.] Diese Platten wurden auch noch mit anderen Abmessungen gehandelt. Aus einer größeren Platte können durchaus mehrere kleinere Platten hergestellt werden. Das Material läßt sich leicht mit einer Laubsäge bearbeiten. Ähnliche Leiterplatten sind in der Zeitschrift FUNKAMATEUR (Heft 6/67, Seite 286, und Heft 8/67, Seite 373) beschrieben. Bestückt werden diese Leiterplatten vorzugsweise auf der Seite, auf der sich nicht die Leiterbahnen (Bestückungsseite) befinden. Reichen die vorgefertigten Leiterzüge zum Herstellen aller notwendigen Lötverbindungen nicht aus, so kann man nicht vollgenutzte Leiterzüge an entsprechender Stelle unterbrechen, um dadurch weitere Verbindungsmöglichkeiten zu schaffen. Die Trennstellen sollten dabei vorsorglich mit einem Lacküberzug versehen werden. Man verhindert dadurch ein eventuelles Lösen der Leiterzüge von der Grundplatte. Durch die Verwendung der genannten Leiterplatten entfällt die oft aufwendige Herstellung einzelner gedruckter Schaltungen. Für den Umgang mit solchen Leiterplatten sei noch einmal kurz auf einige zu beachtende Punkte hingewiesen:

- Die Lötzeit soll so kurz wie möglich sein (maximal 2 bis 3 Sekunden).
- Spitzentemperatur des Lötkolbens $\leqq 280$ °C.
- Leistung des Lötkolbens $\leqq 35$ W.
- Die Lötanschlüsse der verwendeten Bauelemente müssen gut zu löten sein. Es ist sehr vorteilhaft, wenn die Lötanschlüsse etwa 1 mm aus der Leiterplatte herausragen.
- Nach Möglichkeit kein direktes Auslöten von Bauelementen. Nur dort, wo es unbedingt nötig ist. Ansonsten das alte Bauelement so weit wie möglich von der Leiterplatte entfernt abtrennen und das neue an die verbliebenen Enden anlöten.
- Die maximale Strombelastung der Leiterzüge beachten.
- Sehr günstig ist es, vor Lötbeginn die Leiterplatte vorsichtig anzuwärmen. Dadurch wird ein sogenannter Hitzeschock vermieden, der unter Umständen zu einer Verwölbung der Leiter-

platte führen kann. Weiterhin wird durch diese Maßnahme die Lötzeit verkürzt.

— Bei allen Arbeiten ist auf größte Sorgfalt zu achten.

6. Literaturhinweise

[1] *Pilz, G.:* Thyristoren — Eigenschaften und Anwendung, 2., bearbeitete Auflage, Amateurreihe „electronica", Band 139, Militärverlag der DDR (VEB) — Berlin 1975

[2] *Sabrowky, L.:* Thyristor — Schalter und Regler, Franzis-Verlag, München 1970

[3] Thyristoren — Grundlagen und Anwendungen, ITT-Druckschrift, 1971

[4] *Bottke, E.:* Die wichtigsten Eigenschaften von Thyristoren. In „radio fernsehen elektronik" 1971, Heft 18, Seite 607

[5] *Moritz, J./Mundt, R.:* Applikationsbeispiele mit Thyristorbauelementen — Sonderanwendungen. In „Der Elektro-Praktiker" 1972, Heft 4, Seite 105 bis 107

[6] *Regel, W.:* Schaltungsvarianten für die Ansteuerung Thyristoren zur Drehzahleinstellung und Regelung. In „radio fernsehen elektronik" 1972, Heft 5, Seite 169

[7] *Miel, G.:* Elektronische Modellfernsteuerungen — Entwicklungsstand und Perspektiven. In „FUNKAMATEUR" 1973, Heft 10, Seite 495

[8] *Baumgartner, J.:* Farbfernseh-Portable „Super Color 1510 UE". In „Funktechnik" 1973, Heft 17, Seite 605

[9] *Moritz, J./Mundt, R.:* Applikationsbeispiele mit Thyristorbauelementen — Halbleiterschalter. In „Der Elektro-Praktiker" 1971, Heft 11, Seite 354 bis 356

[10] *Schiedewitz, C.:* Kondensatorzündung mit konstanter Funkenergie. In „radio fernsehen elektronik" 1973, Heft 22, Seite 739 bis 743

[11] *Kupfer, K. H.:* Thyristorzündung nach Maß. In „Funktechnik" 1968, Heft 23, Seite 901 bis 904

[12] *Horbaschek, H.:* Kondensator-Zündanlage für Kraftfahrzeuge. In „Funktechnik" 1969, Heft 21, Seite 835 bis 837

[13] Automatisches Ladegerät für Kleinakkumulatoren. In „radio fernsehen elektronik" 1973, Heft 15, Seite 501

[14] Gleichstromwecker. In „radio fernsehen elektronik" 1969, Heft 5, Seite 132

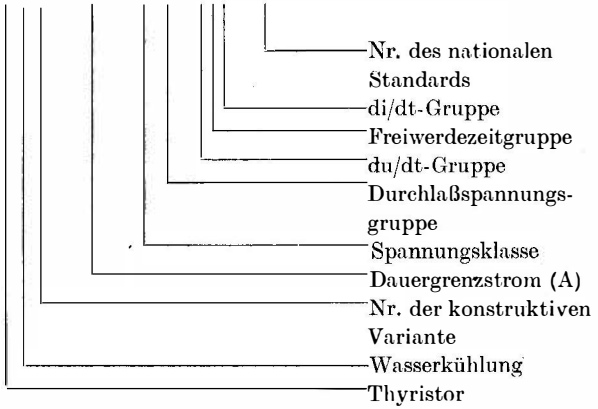
[15] *Höhne, D.:* Thyristornetzteile für 110°-Farbfernsehempfänger. In „Funktechnik" 1972, Heft 11, Seite 411 bis 413
[16] *Mundt, R.:* Neue Hochstromthyristoren aus der UdSSR. In „Elektrie" 1972, Heft 6, Seite 147 bis 149
[17] *Lappe, R.:* Thyristorstromrichter für Antriebsregelungen VEB Verlag Technik Berlin, 1968
[18] *Pfuhl, U.:* Das Einschaltverhalten von Thyristoren. In „Der Elektroanlagenbau" 1967, Heft 4, Seite 175
[19] *Schulze, M.:* Zündung parallel und in Reihe geschalteter Thyristoren. In „Elektrie" 1970, Heft 6, Seite 205 bis 208
[20] *Heider, J./Plaetschke, J.:* Halbleiterbauelemente der Leistungselektronik, Teil 1. In „Der Elektro-Praktiker" 1971, Heft 4, Seite 129 bis 135
[21] *Graichen, G.:* Realisierung von Phasenanschnittsteuerungen mit einfachen RC-Gliedern. In „radio fernsehen elektronik" 1973, Heft 5, Seite 160 bis 165
[22] *Lappe, R.:* Die steuerbaren Halbleiterventile. In „Elektrie" 1963, Heft 17
[23] *Bergmann, H.:* Elektronik in der Kraftfahrzeugtechnik. In „radio fernsehen elektronik" 1972, Heft 3, Seite 101 bis 103
[24] *Hoffmann, A./Stocker, K.:* Thyristor-Handbuch, Siemens-Schuckertwerke AG, 1966
[25] *Steiger, K. P.:* Halbleiterbauelemente der Leistungselektronik aus der UdSSR. In „Elektrie". 1970, Heft 8, Seite 267 bis 272
[26] Kombinat VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder, Datenblätter: Si-Gleichrichterdioden und Si-Thyristoren
[27] ČKD Prag, Datenblätter: Si-Thyristoren
[28] *Jakubaschk, H.:* Das große Elektronikbastelbuch, 4. Auflage, Militärverlag der DDR (VEB) — Berlin 1974
[29] Thyristor-Netzgeräte. In „Funktechnik" 1968, Heft 8, Seite 279 bis 282

7. Anhang

Im Rahmen des RGW wurde im Jahre 1969 eine internationale Standard-Empfehlung für Thyristoren herausgegeben. Diese Empfehlung ist nach Vorschlägen der einzelnen RGW-Länder im wesentlichen auf die IEC-Empfehlung aufgebaut worden. Die wichtigsten Festlegungen dieser RGW-Empfehlung sind nachstehend genannt. (Die Numerierung entspricht dieser Empfehlung.)

7.1. Beispiel für eine Typenbezeichnung

TB 2 – 1000 – 6 E – 141 TOCT . . .
TV 2 – 1000 – 6 E – 141 GOST . . .



7.2. Reihe der Dauergrenzströme

Die Angabe erfolgt vorzugsweise für eine Gehäusetemperatur von 85 °C bei Luftkühlung bzw. 55 °C bei Wasserkühlung. Sie umfaßt die Werte 10; 12,5; 16; 20; 25; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000 A.

7.3. Reihe der Spannungsklasse

Diese Reihe umfaßt die Werte
0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26.
Bei der Multiplikation der Spannungsklasse mit 100 V ergibt sich die zulässige Spitzensperr- und Blockierspannung. Die Nennspannung — definiert als empfohlener Scheitelwert sinusförmiger Anschlußspannungen — beträgt 80% der Klassenspannung.

7.4. Reihe der Durchlaßgruppen

Diese Reihe umfaßt folgende Gruppen der mittleren Durchlaßspannung bei Dauergrenzstrom

Gruppe	A	E	K	M
ΔU in V	0,65	0,65 bis 0,75	0,75 bis 0,85	0,85 bis 1,40

7.5. Reihe der kritischen Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten (du/dt-Gruppen)

Gruppe	1	2	3	4	5	6
du/dt in V/μs	20	50	100	200	500	1000

Bauelemente ohne festgelegte du/dt-Gruppe erhalten die Gruppenbezeichnung 0 (Null).
Die Angaben gelten für die maximale zulässige Sperrschichttemperatur.

7.6. Reihe der Freiwerdezeit (Freiwerdezeitgruppe)

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Freiwerdezeit in μs	250	150	100	70	50	30	20	15	12

Bauelemente ohne festgelegte Freiwerdezeit erhalten die Gruppenbezeichnung 0 (Null).

Die Angaben erfolgen für die maximal zulässige Sperrschichttemperatur.

7.7. Reihe der kritischen Stromanstiegsgeschwindigkeiten (di/dt-Gruppe)

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8
di/dt in A/μs	20	50	100	200	400	600	800	1000

Bauelemente ohne festgelegte Stromanstiegsgeschwindigkeit erhalten die Gruppenbezeichnung 0 (Null).
Die Angaben erfolgen für die maximal zulässige Sperrschichttemperatur.

Tabelle 1 DDR-Thyristoren (1)

		ST 111/1
Betriebsscheitelspannung	V	70
Periodische und nichtperiodische Spitzenspannung	V[1])	100
Mittlerer Durchlaßstrom	A[2])	
mit Kühlkörper K 25/M 8	A[3])	
K 50/M 8	A[3])	
Effektiver Durchlaßstrom	A	
Periodischer Spitzendurchlaßstrom	A	
Grenzstrom	A[4])	
Durchlaßspannung bei 60 A	V	
Haltestrom bei 25 °C	mA	
Zündspannung	V[5])	
Zündstrom	mA[5])	
Nichtzündspannung	V[6])	
Kritische Spannungsanstiegsgeschwindigkeit	V/μs[7])	
Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit	A/μs[8])	
Einschaltzeit	μs[9])	
Freiwerdezeit	μs[10])	
Sperrschichttemperatur	°C	
Innerer Wärmewiderstand	grd/W	
Äußerer Wärmewiderstand		
bei K 25/M 8	grd/W	
K 50/M 8	grd/W	
Masse des Thyristors	g	
mit Kühlkörper K 25/M 8	g	
K 50/M 8	g	
Montagedrehmoment	kpm	

Erläuterungen zu Tabelle 1

[1]) Höchstzulässige Dauer der periodischen Spitzenspannung = 1 ms. Höchstzulässige Dauer der nichtperiodischen Spitzenspannung = 5 ms.

[2]) Mittlerer Durchlaßstrom bei sinusförmigem Verlauf des Stromes und einer Gehäusetemperatur von 85 °C.

[3]) Mittlerer Durchlaßstrom (Dauergrenzstrom) bei sinusförmigem Stromverlauf, natürlicher Luftkühlung, 45 °C Umgebungstemperatur und Kühlkörper.

[4]) Grenzstrom bei 25 °C, eine Sinushalbwelle.

[5]) Bei 25 °C und 12 V Blockierspannung.

[6]) Bei 110 °C und dem Grenzwert der Spitzenspannung.

/2	/4	/6	/8	*ST 121/1* /2	/4	/6	/8
140	280	420	560	70	140	280	420	560
200	400	600	800	100	200	400	600	800
	13					23		
	≈ 9					≈ 12		
	≈ 13					≈ 16		
	25					40		
	90					140		
	200					300		
	≦ 2					≦ 2		
	≦ 80					≦ 80		
	≦ 3					≦ 3		
	≦ 100					≦ 100		
	0,3					0,3		
	20					20		
	20					20		
	Typ (3 ... 6)					Typ (3 ... 6)		
	Typ (60 ... 120)					Typ (60 ... 120)		
	(—40 ... + 100)					(—40 ... + 125)		
	≦ 1,3					≦ 1,0		
	≈ 3,3					≈ 3,3		
	≈ 1,8					≈ 1,8		
	≈ 25					≈ 25		
	≈ 290					≈ 290		
	≈ 850					≈ 850		
	0,6					0,6		

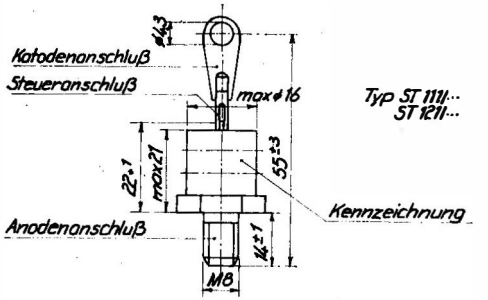
[7]) Kritische Anstiegsgeschwindigkeit der Blockierspannung bei 110 °C und Spannungsanstieg auf den Grenzwert der Betriebsscheitelspannung.

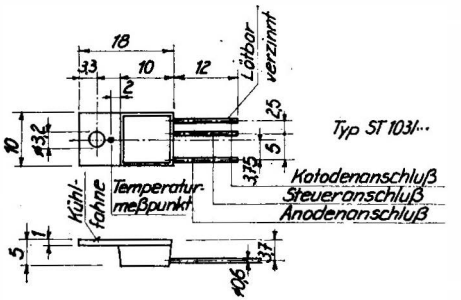
[8]) Kritische Anstiegsgeschwindigkeit des Durchlaßstromes bei 110 °C und Stromanstieg auf 50 A.

[9]) Bei 25 °C und Stromanstieg auf 20 A.

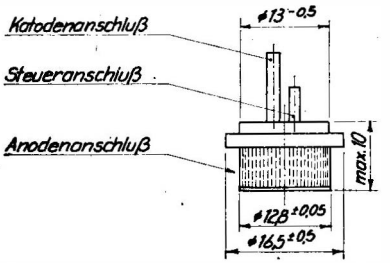
[10]) Bei 110 °C (*ST 111*); 125 °C (*ST 121*) und Sperrspannung mindestens 100 V.

Die angegebenen Grenzwerte sind Maximalwerte und gelten für eine Betriebsfrequenz von 40 Hz bis 60 Hz. Alle Werte gelten im gesamten Betriebstemperaturbereich.

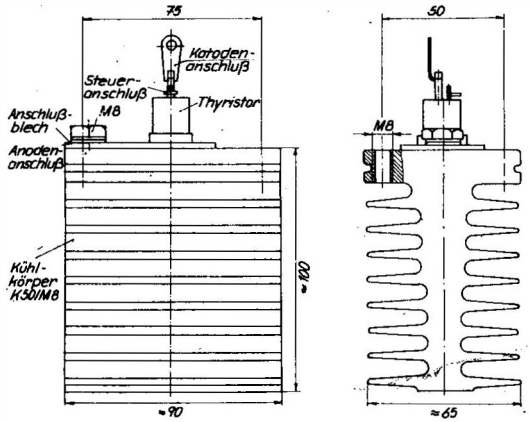

Katodenanschluß
Steueranschluß
Anodenanschluß
max ⌀16
max 21
22±1
55±3
41±1
M8
Kennzeichnung
Typ ST 111/...
ST 121/...


18
3,3
10
12
2
Lötbar verzinnt
25
5
3,75
10
⌀3,2
Kühlfahne
Temperaturmeßpunkt
Katodenanschluß
Steueranschluß
Anodenanschluß
5
1
3,7
⌀10,6
Typ ST 103/...

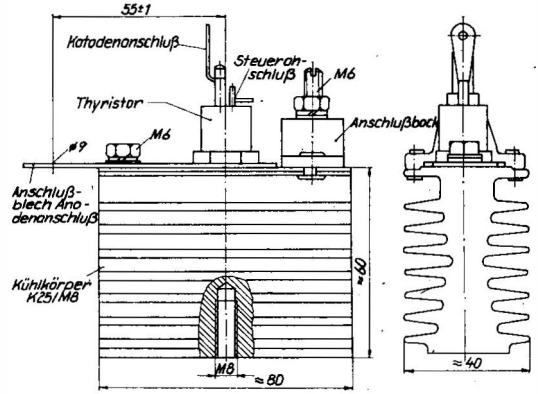
2


Katodenanschluß
Steueranschluß
Anodenanschluß
⌀13 -0,5
max 10
⌀12,8 ±0,05
⌀16,5 ±0,5
Typ ST 108/...

3


75
50
Katoden-
anschluß
Steuer-
anschluß
Thyristor
M8
Anschluß-
blech
Anoden-
anschluß
M8
Kühl-
körper
K50/M8
≈100
≈90
≈65

4


55±1
Katodenanschluß
Steueran-
schluß
M6
Thyristor
M6
Anschlußbock
ø9
Anschluß-
blech Ano-
denanschluß
Kühlkörper
K25/M8
≈60
M8
≈80
≈40

5

Tabelle 2 DDR-Thyristoren (2 und 3)

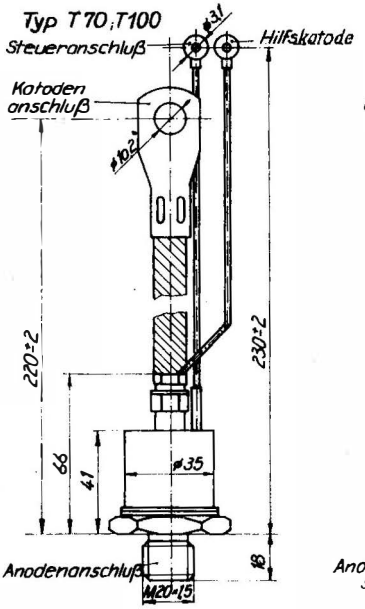
Periodische Spitzensperrspannung	V
Dauergrenzstrom	A
Effektiver Durchlaßstrom	A
Periodischer Spitzenstrom	A
Stoßstrom (10 ms)	A
Grenzlastintegral I^2t bei $\vartheta_j = 125$ °C	A^2s
Höchster Steuerstrom	A
Steuerverlustleistung	W
Kritische Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt	$V/\mu s$
Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	$A/\mu s$
Sperrschichttemperatur	°C
Lagertemperatur	°C
Durchlaßspannung	V
Zündspannung	V
Zündstrom	mA
Haltestrom bei 25 °C	mA
Sperrstrom	mA
Einschaltzeit bei $\vartheta_j = 25$ °C	μs
Freiwerdezeit	μs
Innerer Wärmewiderstand	grd/W
Masse	g

ST 103/1 ... /6	*ST 108/2 ... /6*
100 ... 600	200 ... 600
(in Stufen von 100 V)	(in Stufen von 100 V)
3	8
4,5	
15	50
40	
8	
1	
0,5	
20	≦ 20
5	≦ 20
min — 40 max. + 125	+ 110
— 40 ... + 125	
≦ 2	2
≦ 3	3
< 20	150
< 20	
≦ 1	10
≈ 3	
< 100	60
6	
≈ 2	

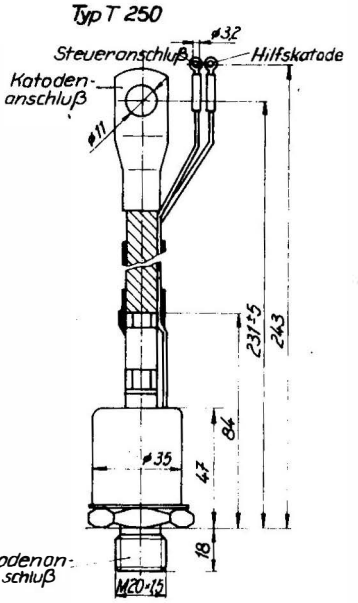
Tabelle 3 ČSSR-Thyristoren (6 bis 8)

		T 16/1 ... 12
Positive und negative Spitzensperrspannung	V	100 bis 1200
Nennstrom	A	16
Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt	V/µs	20
Durchlaßspannung	V	1,5
Stromüberlastbarkeit 10 ms	A	150
Grenzlastintegral I^2t	A^2s	110
Haltestrom	mA	60
Oberer Zündstrom	mA	150
Obere Zündspannung	V	3
Mittlerer Steuerverlust	W	0,5
Spitzensteuerverlust	W	5
Höchster Steuerstrom	A	2
Höchste positive Steuerspannung	V	10
Höchste negative Steuerspannung	V	5
Thermischer Innenwiderstand	°C/W	1,3
Betriebstemperaturbereich	°C	
Lagertemperaturbereich	°C	
Betriebsfrequenzbereich	Hz	
Sperrstrom bei periodischer Spitzensperrspannung	mA	2

T'25/1 ... 12	*T70/1 ... 12*	*T100/1 ... 12*	*T'200/1 ... 12*
(In Abständen von 100 V)			
25	70	100	200
20	20	20	20
1,7	1,4	1,4	0,6
250	1120	1800	3140
300	9000	15000	40000
60	80	80	150
150	300	300	300
3	3	3	3
0,5	1	1	1
5	5	5	10
2	2	2	3
10	10	10	10
5	5	5	5
1	0,22	0,22	0,14
— 40 bis + 110			
— 40 bis + 125			
50 bis 400			
2	5	5	6

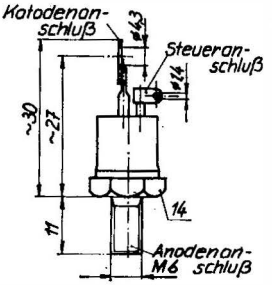


6



7

Typ T16; T25



8

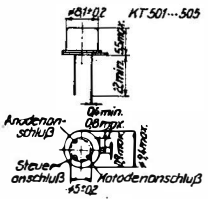
Tabelle 4 ČSSR-Si-Thyristoren (9)

		KT501	*KT 502*	*KT'503*	*KT'504*	*KT'505*
Periodische Spitzensperrspannung	V	50	100	300	300	400
Dauergrenzstrom	A			1		
Sperrschichttemperatur	°C			125		
Durchlaßspannung	V			1,7		
Obere Zündspannung	V			3		
Zündstrom	mA			10		
Haltestrom bei 25 °C	mA			17		
Einschaltzeit	µs			1		
Freiwerdezeit	µs			40		

Hinweis zum Anschluß der Thyristoren *KT710 ... 714* und *KT701 ... 705:*

Anodenanschluß = Gewinde
Katodenanschluß = langer Anschluß
Steueranschluß = kurzer Anschluß

KT710	KT711	KT712	KT713	KT714	KT701	KT702	KT703	KT704	KT705
50	100	200	300	400	50	100	200	300	400
		3					15		
		125					125		
		2					1,7		
		3					3		
		15					40		
		20					50		
		2							
		40							



9

Tabelle 5 Sowjetische Thyristoren (Normaltypen und Lawinenthyristoren)

		ВКЧ-*10* (*VKU-10*)	*T-25* (*T-25*)	*T-50* (*T-50*)
Nennstrom	A	10	25	50
Dauergrenzstrom bei $\vartheta c = 85$ °C	A	8	18 bis 32[2])	32 bis 62[2])
Stoßstrom (10 ms)	A	150	1000	1500
Nennspannung	V	25 bis 600	50 bis 1000	50 bis 1000
Statischer Haltestrom bei 25 °C	mA	$\leqq$ 50	$\leqq$ 400	$\leqq$ 400
Zündstrom bei 25 °C	mA	$\leqq$ 150	$\leqq$ 300	$\leqq$ 300
Zündspannung	V	$\leqq$ 5	$\leqq$ 5	$\leqq$ 5
maximale Freiwerdezeit bei $\vartheta_{j\,max}$	μs	35	50, 140 400	50, 140 400
Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	A/μs	20	10	10
Kritische Spannungsgeschwindigkeit du/dt	V/μs	50	20	20
Innerer Wärmewiderstand	grd/W	2,5	1,5	0,8
Betriebstemperatur ϑ_a	°C	— 40 bis + 120	— 50 bis + 125	— 50 bis + 125
Masse (ohne Kühlkörper)	g	24	120	190

[1]) Stoßstrom für anschließend anliegende Spannung
[2]) In Abhängigkeit von der Durchlaßspannungsgruppe

T-150 *(T-150)*	ТЛ-*100* *(TL-100)*	ТЛ-*150* *(TL-150)*	ТЛ-*200* *(TL-200)*	ТЛ-*250* *(TL-250)*	ТЛВ-*320* *(TLV-320)*
150	100	150	200	250	320
132 bis 172[2])	100	150	200	250	
3300	1500[1])	2000[1])	2500[1])	4000[1])	4400[1])
50 bis 1000	400 bis 700	540 bis 700	400 bis 700	500 bis 800	400 bis 800
≦ 500	≦ 100	≦ 100	≦ 100	220	220
≦ 300	≦ 300	≦ 300	≦ 300	—	≦ 400
≦ 7	≦ 7	≦ 7	≦ 7	—	≦ 6
50, 140 400	150	150	150	50, 140 400	50, 140 400
10	20	20	20	20	20
20	100	100	100	100	100
0,2	0,18	0,18	0,18	0,15	0,15
— 50 bis + 125	— 50 bis + 125	— 50 bis + 125	— 50 bis + 125	— 50 bis + 140	+ 5 bis + 140
450	500	500	500	850	850

Tabelle 6 Sowjetische Thyristoren für höhere Frequenzen

		ТЧ-*10* (*TC-10*)	ТЧ-*16* (*TC-16*)	ТЧ-*25* (*TC-25*)
Nennstrom	A	10	16	25
Dauergrenzstrom bei $\vartheta_c = 85$ °C	A	10	16	25
Stoßstrom (10 ms)	A	150[1])	170[1])	200[1])
Nennspannung	V			
Statischer Haltestrom bei 25 °C	mA	$\leqq 95$	$\leqq 95$	$\leqq 95$
Zündstrom bei 25 °C	mA	800	800	800
Zündspannung	V	2	2	2
maximale Freiwerdezeit bei $\vartheta_{j\,max}$	μs			
Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	A/μs			
Kritische Spannungsgeschwindigkeit du/dt	V/μs			
Innerer Wärmewiderstand	grd/W	0,8	0,8	0,8
Betriebstemperatur ϑ_a	°C			
Masse (ohne Kühlkörper)	g	100	100	100

[1]) Stoßstrom für anschließend anliegende Spannung

ТЧ-*40* (*TC-40*)	ТЧ-*50* (*TC-50*)	ТЧ-*63* (*TC-63*)	ТЧ-*80* (*TC-80*)	ТЧ-*100* (*TC-100*)	ТЧ-*125*) (*TC-125*)
40	50	63	80	100	125
40	50	63	80	100	125
800[1])	1000[1])	1200[1])	1400[1])	1500[1])	1700[1])
	100 bis 500				
≦ 55	≦ 55	≦ 55	≦ 55	≦ 55	≦ 55
900	900	1000	1000	1000	1000
1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	20				
	100				
	100				
0,3	0,3	0,18	0,18	0,18	0,18
	— 40 bis + 110				
200	200	300	300	300	300

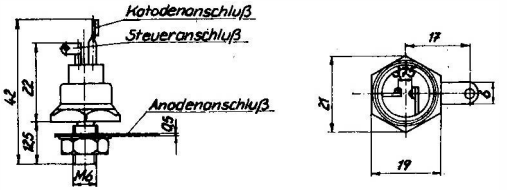
Tabelle 7 Sowjetische Thyristoren (Scheibenzellen und Bauelemente für erhöhte dynamische Beanspruchung)

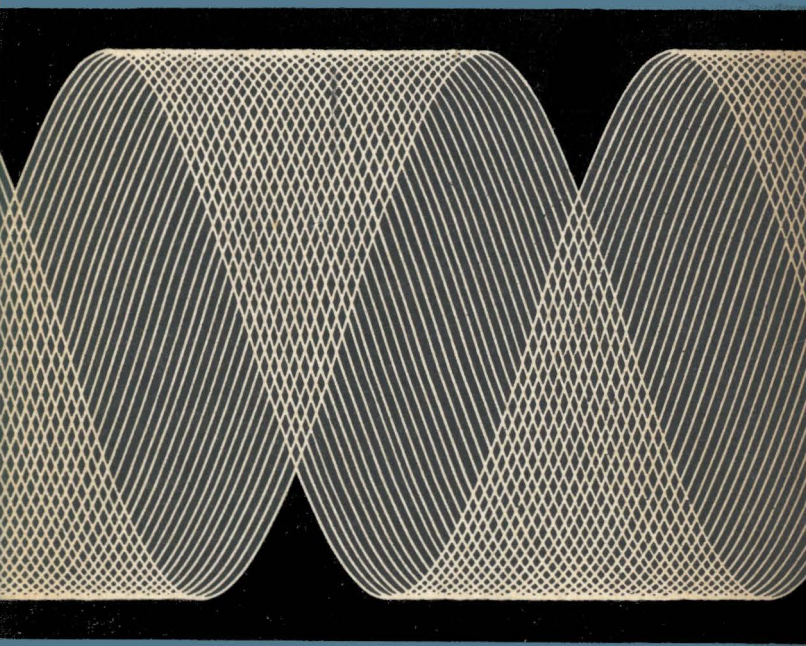
Typen		*TT-200* *(TT-200)*	*TT-250* *(TT-250)*
Nennstrom	A	200	250
Dauergrenzstrom bei $\vartheta_c = 85$ °C	A	200	250
Stoßstrom 10 ms für anschließend anliegende Spannung	A	4500	5000
Klassenspannung	V		100 bis 1200
Statischer Haltestrom bei 25 °C	mA	90	90
Zündstrom bei 25 °C	mA	≤ 200	≤ 180
maximale Freiwerdezeit bei $\vartheta_{j\,max}$	μs	Gr. 0'	1 2
		—	250 120
Zündspannung	V	1,7	1,5
Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	A/μs	75 bis 30	
Kritische Spannungsgeschwindigkeit du/dt	V/μs	Gr. 0	1 2
		—	20 50
Wärmewiderstand	grd/W	(0,20)	(0,20)
Betriebstemperatur ϑ_a	°C		— 50 bis + 125
Masse (ohne Kühlkörper)	g	2400(500)	2400(500)

ТТ-300 *(TT-300)*	ТД-*160* *(TD-160)*	ТД-*200* *(TD-200)*	ТД-*250* *(TD-250)*
300	160	200	250
300	160	200	250
5500	3500	4000	4400
		100 bis 1200	
90	90	90	90
160	≦ 600	≦ 600	≦ 600
3	Gr. 0	1 2	3
85	—	250 120	85
1,4	8	8	8
		75 bis 30	
3 4	Gr. 0	1 2	3 4 5
100 200	—	20 50	100 200 500
(0,20)	0,13	0,15	0,15
		— 50 bis + 125	
2400(500)	4500(350)	4500(350)	4500(350)

Tabelle 8 Sowjetische Thyristoren (10)

		KU202A	*KU202B*	*KU202W*	*KU202G*
Periodische Spitzen-sperrspannung	V	25	25	50	50
Dauergrenzstrom	A				
Sperrschicht-temperatur	°C				
Durchlaßspannung	V				
Obere Zündspannung	V				
Zündstrom	mA				
Haltestrom bei 25 °C	mA				
Einschaltzeit	µs				
Freiwerdezeit	µs				



10

100	100	200	200	300	300	400	400
	10						
	70						
	2						
	10						
	300						
	100						
	50						
	150